

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2011

Bc. Vít Houdek

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Dynamika dodávky elektrické energie
z obnovitelných zdrojů
Renewable electric power sources dynamics

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vít Houdek**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Dynamika dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů**
Renewable electric power sources dynamics

Zásady pro vypracování:

1. Teorie solárních a větrných elektráren
 2. Popis větrné elektrárny Veselí u Oder
 3. Popis solární elektrárny na nové knihovně VŠB-TU Ostrava
 4. Metodika kvantifikace stability dodávaného výkonu obnovitelných zdrojů
 5. Vyhodnocení stability dodávky vybraných obnovitelných zdrojů
1. Solar and wind power plants theory
 2. Wind power plant Veselí
 3. Solar power plant on "Nova Knihovna"-building at VSB-TU of Ostrava
 4. Quantification method of renewables power supply stability
 5. Evaluation of chosen renewables power supply stability

Seznam doporučené odborné literatury:

dle doporučení vedoucího DP

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Poděkování:

Děkuji Ing. Tadeuszi Sikorovi, Ph.D., vedoucímu této diplomové práce, za poskytnutí důležitých a věcných informací.

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Cílem diplomové práce je vyhodnotit dynamiku dodávané elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Pro konkrétní hodnocení byla vybrána jedna větrná a jedna fotovoltaická elektrárna. V úvodní kapitole diplomové práce jsou popsány principy využití větrné a sluneční energie pro výrobu elektrické energie, v dalších dvou kapitolách je popis větrné elektrárny Veselí u Oder a fotovoltaické elektrárny na budově NK VŠB-TU Ostrava.

Pro vyhodnocení dynamiky z obnovitelných zdrojů je použita metoda četnosti změny výkonu, tato metoda je popsána ve čtvrté kapitole včetně návodu pro EXCEL. V závěrečné části této práce je konkrétní vyhodnocení a porovnání vybraných obnovitelných zdrojů pomocí zvolené metody.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje elektrické energie, větrná energetika, sluneční energetika, větrné elektrárny, fotovoltaické elektrárny, Betzovo pravidlo, větrný motor, solární článek, solární panel, dynamika dodávky elektrické energie, kolísání výkonu, stabilita dodávaného výkonu.

Abstract

The thesis aims to evaluate the dynamics of the electricity supplied from renewable sources. For a particular evaluation was a selected wind and a photovoltaic power plant. In the introductory chapter of the thesis describes the principles of the use of wind and solar energy for electricity generation in the next two chapters is a description of windmills Veselí u Oder and photovoltaic power plant at NK building of the VŠB-TU Ostrava.

For evaluation the dynamics of renewable resources used the method frequency change in power, this method is described in the fourth chapter, including instructions for Excel. In the final part of this work is a concrete evaluation and comparison of selected renewable energy sources by the chosen method.

Key words

Renewable energy, wind energy, solar energy, wind power plants, photovoltaic power plants, Betz's law, wind engine, solar cell, solar panel, the dynamics of power supply, power fluctuations, the stability of the supplied power.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbols:

A	plocha	(m ²)
A_{VM}	plocha větrného motoru	(m ²)
A_1	plocha vstupujícího toku větru	(m ²)
A_2	plocha vystupujícího toku větru	(m ²)
AM	AirMass – složení spektra světla	(-)
C_P	výkonový součinitel	(-)
\check{C}_i	četnost výkonové změny	(-)
$\check{C}_{\%i}$	relativní četnost změny	(%)
E	energie	(J)
E_P	potenciální energie	(J)
E_K	kinetická energie	(J)
E_v	energie větru	(J)
EFF	účinnost solárního článku	(-)
F_a	axiální síla	(N)
FF	činitel zaplnění	(-)
g	gravitační zrychlení	(m·s ⁻²)
h	nadmořská výška	(m)
I_{MPP}	proud při maximálním výkonu	(A)
I_{SC}	zkratový proud	(A)
k_b	Betzův koeficient účinnosti	(-)
m	hmotnost	(kg)
P	výkon	(W)
P_{MAX}	maximální výkon solárního článku	(Wp)
P_N	jmenovitý výkon	(W)
P_t	výkon v čase t	(W)
P_v	výkon jednotkovou plochou	(W)
P_{VM}	výkon větrného motoru	(W)
$P_{\%}$	relativní hodnota výkonu	(%)
$P_{\%t}$	relativní hodnota výkonu v čase t	(%)
p_b	barometrický tlak	(Pa)
$p_{b(0)}$	barometrický tlak na hladině moře	(Pa)
$p_{b(h)}$	barometrický tlak v určité výšce	(Pa)
r	délka listu vrtule	(m)
r	plynová konstanta	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
s	výška	(m)
T	termodynamická teplota	(K)
t	teplota	(°C)
t	čas	(s)
U_{0C}	napětí naprázdno	(V)
U_{MPP}	napětí při maximálním výkonu	(V)
V	objem	(m ³)
v	rychlost	(m·s ⁻¹)
v_1	rychlost vstupujícího větru	(m·s ⁻¹)
v_2	rychlost vystupujícího větru	(m·s ⁻¹)
ΔE_k	rozdíl energie	(J)
η_i	účinnost	(-)
λ_0	rychlostní poměr	(-)
ρ	hustota	(kg·m ⁻³)

Zkratky:

EMC	elektromagnetická kompatibilita
ERÚ	Energetický regulační úřad
EVA	technologie zapouzdření fotovoltaických článků
FACTS	flexibilní střídavá přenosová síť
FVE	fotovoltaická elektrárna
FV	fotovoltaika
Grid-off	systém nepřipojený do sítě
Grid-on	systém připojený do sítě
HERIC	označení moderních měničů pro fotovoltaiku
IGBT	tranzistory s izolovaným hradlem
MPP	bod maximálního výkonu solárního článku
NK	budova nové knihovny VŠB-TUO
Off-shore	větrné elektrárny v moři
On-shore	větrné elektrárny na pobřeží
OptiSpeed	technologie kontroly otáček větrné elektrárny
OptiTip	regulační systém nastavení listů větrné elektrárny
SCO72	řada fotovoltaických panelů Solartec 72
SFŽP	Státní fond životního prostředí
STC	označení zkoušky fotovoltaických panelů
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
VtE	větrná elektrárna
V90	typ větrné elektrárny

Obsah

Úvod	1
1. Teorie solárních a větrných elektráren	2
1.1. Teoretické základy větrných elektráren	2
1.1.1. Větr a jeho využití	2
1.1.2. Větrné motory	3
1.1.3. Regulace větrných motorů	5
1.1.4. Energie větru	6
1.1.5. Betzova teoretická účinnost	9
1.1.6. Větrné elektrárny	12
1.2. Teoretické základy solárních elektráren	15
1.2.1. Slunce a využití energie	15
1.2.2. Principy využití sluneční energie	15
1.2.3. Solární elektrárny	16
1.2.4. Fotovoltaické elektrárny	19
1.2.5. Solární články	22
1.2.6. Solární panely	26
1.2.7. Měniče	28
1.3. Problematika provozu obnovitelnými zdroji elektrické energie	28
2. Popis větrné elektrárny Veselí u Oder	30
2.1. Větrná elektrárna Veselí u Oder	30
2.2. Vestas V90	31
2.3. Charakteristiky větrné elektrárny	32
2.3.1. Výkonová charakteristika	32
2.3.2. Tok výkonu	33
2.3.3. Součinitel využití	33
3. Popis solární elektrárny na nové knihovně VŠB-TU Ostrava	35
3.1. Solární elektrárna na budově NK	35
3.2. Panely Solartec SCO72	35
3.3. Charakteristiky fotovoltaické elektrárny	36
3.3.1. Výkonová charakteristika	36
3.3.2. Tok výkonu	37
3.3.3. Součinitel využití	38
4. Metodika kvantifikace stability dodávaného výkonu obnovitelných zdrojů	39
4.1. Četnost změny výkonu	39
4.1.1. Číselná četnost změny výkonu	39
4.1.2. Procentuální četnost změny výkonu	39
4.2. Stanovení četnosti změny výkonu	39
4.2.1. Úprava naměřených dat	39
4.2.2. Stanovení rozdílu výkonu	40
4.2.3. Výpočet četností pomocí analytického nástroje Histogram	41
4.2.4. Výpočet relativní četnosti změny výkonu	43
4.3. Vyhodnocení četnosti změny výkonu	43
5. Vyhodnocení stability dodávky vybraných obnovitelných zdrojů	45
5.1. Data z vybraných obnovitelných zdrojů	45
5.2. Četnost výkonových změn VtE Veselí u Oder	46
5.3. Četnost výkonových změn FVE VŠB-TU Ostrava	49
5.4. Porovnání četnost výkonových změn VtE a FVE	51
Závěr	52
Literatura	53

Úvod

Obnovitelné zdroje energie se v dnešní době velmi rozšířily a to hned z několika důvodů. Jedním z důvodů je ekologie, zhoršující se klimatické podmínky na zemi jsou z určité části způsobeny spalováním fosilních paliv pro výrobu elektrické energie v tepelných elektrárnách. Druhý důvod zavádění obnovitelných zdrojů jsou ztenčující se světové zásoby neobnovitelných zdrojů, a tak se hledá jakým způsobem v budoucnu tyto zdroje lidstvo nahradí.

Mezi hlavní obnovitelné zdroje patří sluneční, větrná, vodní, geotermální energie a energie z biomasy. Pro výrobu elektrické energie se především rozšířily větrné a solární elektrárny.

Hlavním problémem těchto zdrojů elektrické energie je velká časová variabilita vyráběného výkonu v závislosti na rychlosti větru respektive na intenzitě slunečního záření. Jelikož podíl větrných a solárních elektráren v elektrizační soustavě vzrůstá, řeší se spolehlivost dodávky elektrické energie. Navíc v elektrizační soustavě musí být dostatečná rezerva výkonu, připravená na možný výpadek elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Pro stanovení výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů se dělají predikční modely výroby. Dále se zkoumá možnost akumulace elektrické energie do vodíku.

Tato diplomová práce se zabývá vyhodnocením dynamiky dodávané elektrické energie z vybraných obnovitelných zdrojů. Jsou zde popsány základy přeměny energie větru respektive sluneční energie na elektrickou energii. Popis větrné farmy Veselí u Oder a popis sluneční elektrárny umístěné na budově NK VŠB-TU Ostrava. Dále je popsána metoda vyhodnocení dynamiky dodávky a nakonec vyhodnocení pomocí této metodiky.

1. Teorie solárních a větrných elektráren

1.1. Teoretické základy větrných elektráren

Každá větrná elektrárna se obecně skládá z větrného motoru a elektrického generátoru. Větrný motor slouží k přeměně kinetické energie větru na točivou mechanickou energii a elektrický generátor tuto mechanickou energii přeměňuje na elektrickou energii. Mezi další zařízení větrné elektrárny patří transformátor, převodovka mezi větrným motorem a generátorem, regulace otáčení, hlavní brzdy a pomocné brzdy rotoru, motory pro natáčení gondoly větrné elektrárny, důležitým prvkem celé konstrukce je i stožár, který musí být navržen s ohledem na nepříznivé povětrnostní podmínky, aby nedošlo ke zničení větrné elektrárny. [1]

1.1.1. Vítr a jeho využití

První zaznamenané využití energie větru jsou kresby plavidel na Nilu kolem roku 5000 př.n.l. První záznamy o větrných mlýnech pochází z Persie, ty jsou staré asi 2200 let, jedná se o větrné motory se svislou osou, větrné motory s vodorovnou se objevily až kolem 3. století př.n.l. v Egyptě. Ve 13. století n.l. se dostávají větrné motory i do Evropy, ve 14. století se vedoucí zemí stalo Holandsko a v 17. století vysušilo první poder. Větrné motory se v té době používaly na mletí obilí, vysoušení mokřin a k různým dalším pohonům. Brzy se rozšířily po celé Evropě, od 19. století se v USA objevují ve velkém počtu mnohalopátková kola, především k čerpání vody. Na počátku dvacátého století se začaly stavět velké větrné motory o velkém výkonu. Například v SSSR v roce 1931 výkon 100 kW, v USA rok 1941 výkon 1250 kW. V šedesátých letech 20. století nastal útlum, ale počátkem růstu cen paliv v 70. letech začal opětovný vývoj. V dnešní době se řeší otázky kolem skleníkového efektu a možnosti vyčerpání primárních zdrojů energie, a proto je vývoj větrných elektráren velmi dynamický. [1]

Zdrojem energie větrné elektrárny je vítr, ten vzniká rozdílem atmosférických tlaků. Tyto rozdíly jsou způsobeny rozdílem teplot. Pokud tedy máme místo s vyšším tlakem vzduchu, vzniká proudění vzduchu do místa s nižším tlakem, rychlost tohoto proudění pak závisí na rozdílu těchto tlaků. Rozdíly teplot a tím pádem i rozdíly tlaků jsou způsobeny slunečním zářením. Zhruba 2 % sluneční energie ze záření se promění ve větrnou energii. Potenciál větrné energie by tak dokázal pokrýt spotřebu primární energie několikanásobně, ale lidstvo dokáže využít pouze malou část. Na proudění vzduchu, ale působí další síly, například rotace Země kolem své osy, místní tlakové výše a níže.[2]

Jelikož platí vztah (1.14) odvozený v kapitole 1.1.4., že výkon větrné elektrárny roste s třetí mocninou rychlosti větru, je tedy nejlepší dovést na vrtuli větrného motoru co nejvyšší rychlost větru. Nejlepší místa pro umístění větrných elektráren by bylo na volném moři, kde proudění vzduchu nic nebrání. V dnešní době se proto rozšířila výstavba větrných elektráren v moři, především v Dánsku a Německu, tyto elektrárny se označují jako „offshore“, další možností výstavby je na pobřeží tzv. „onshore“. Samozřejmě ne všechny státy mají přístup k moři, ale i ony mohou využít potenciál větrné energie, v těchto státech se staví větrné elektrárny ve vyšších zeměpisných polohách, na kopcích. Zde se však nesmí zapomenout, že výkon s rostoucí nadmořskou výškou klesá, protože klesá hustota vzduchu. Na těchto místech pak vznikají tzv. větrné farmy, místo kde se postaví více větrných elektráren. Nesmí se zapomenout, že si však jednotlivé elektrárny mohou brát větrné proudy.[2]

Před výstavbou větrné elektrárny je důležité vědět jaký vítr, rychlost, četnost větru je v dané lokalitě. Tyto měření v ČR provádí síť meteorologických stanic. Pro měření platí určité standarty. Standardně se měří rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí, ten je pak pro potřebu přepočten na vyšší výšku, dohodnuty jsou i časy snímání tak i označování směru větru. Rychlost větru se také převádí na stupně podle Beaufortovi stupnice, Beaufortova stupnice má 12 stupňů. Četnost větru se udává buď pomocí sloupcového diagramu popřípadě funkcí. Tato funkce se označuje jako distribuční charakteristika rychlostí větru. Pro přesnou klasifikaci charakteristik větru se stanoví náhradních

distribučních funkce, kde pro výpočty je použito Weibullovo rozdělení větru. Využitelné rychlosti větru se pohybují od 3 do $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [1]

1.1.2. Větrné motory

Nejdůležitějším prvkem každé větrné elektrárny je větrný motor. Zařízení které mění kinetickou energii větru na mechanickou energii. Zjednodušeně se dá říci, že větrný motor je sběrač energie větru a navíc ji mění na energii na hřídeli.

Větrné motory můžeme dělit podle mnoha hledisek. Nejdůležitější hlediskem je aerodynamický princip, který určuje princip sběru větru. Existují dva aerodynamické principy:

- Odporový
- Vztlakový

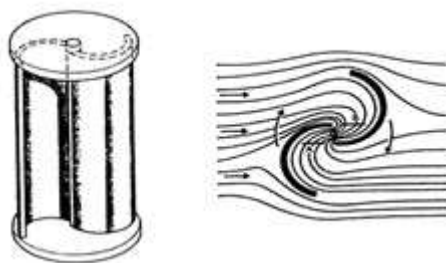
Dalším významným hlediskem je umístění osy otáčení větrného motoru, máme dvě možnosti:

- Svislá osa otáčení
- Vodorovná osa otáčení

Větrné motory na odporovém principu

Větrné motory na odporovém principu jsou nejstarší používané větrné motory. Základní podstata je nastavení aerodynamického odporu vůči toku větru. Plocha aerodynamického odporu zpomaluje tok větru a na plochu je tak vyvolávána síla, která je přeměňována na rotační pohyb. Je však nutné zajistit, aby se tato plocha dostala na výchozí místo. To se dá uskutečnit třemi způsoby.

První způsob je, že plocha aerodynamického odporu musí mít různý odpor při různých směrech. Druhý způsob je použití krytu na část rotoru který se pohybuje proti větru. Třetí možností je měnit velikost plochy rotoru vystavenou větru podle toho, zda se pohybuje ve směru nebo proti směru větru.



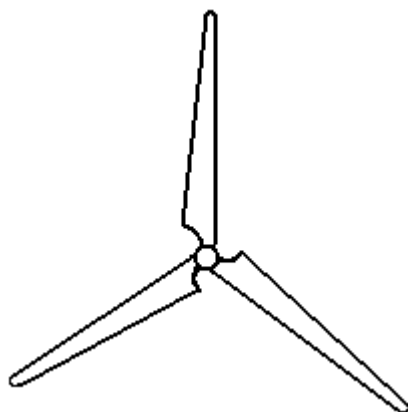
Obr.1.1 – Rotor typu Savonius [16]

Mezi nejrozšířenější větrné motory na odporovém principu patří miskový anemometr a rotor typu Savonius (Obr.1.1), oba dva tyto větrné motory mají svislou osu otáčení. Miskový anemometr se používá především pro měření rychlosti větru. Rotor Savonius se pro svou konstrukční jednoduchost používá především pro amatérské stavby větrných elektráren. Konstrukce různých typů větrných motorů na odporovém principu se mohou výrazně lišit, ale princip je stále stejný.

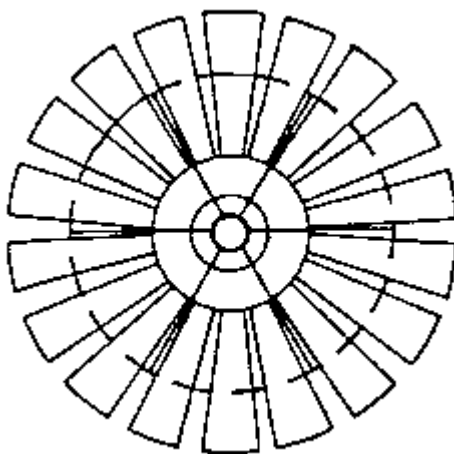
Větrné motory na vztakovém principu

Vrtule a větrná kola s vodorovnou osou otáčení jsou zástupci vztakového principu. Vrtule mají dva nebo tři aerodynamické listy (Obr.1.2). Pokusně se vyrábějí i jednolisté vrtule s protizávažím. U velkých větrných elektráren se velmi rozšířily třílisté vrtule, z důvodu dobrého součinitele využití C_p (Tab.1.1).

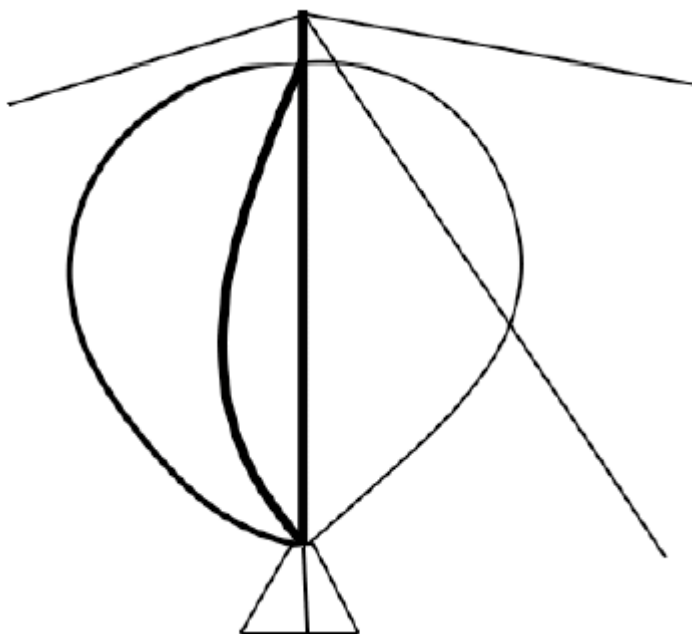
Větrná kola se liší od vrtulí především větším počtem lopatek. Klasickým zástupcem je americké větrné kolo (Obr.1.3).



Obr.1.2 – Třílístá vrtule [1]



Obr.1.3 – Americké větrné kolo [1]



Obr.1.4 – Větrný motor typu Darrieus [1]

Mezi další představitele větrného motoru na vztlakovém principu, tentokrát však s vodorovnou osou patří větrný motor typu Darrieus, který vynalezl stejnojmenný francouzský inženýr. Základní typ vypadá jak řecké písmeno Φ (Obr.1.4) existuje však spousta variant s různým počtem listů.[1]

1.1.3. Regulace větrných motorů

Z důvodu variability rychlosti větru v čase, je nutné větrné motory regulovat, aby z důvodu vysoké rychlosti nedošlo k poškození zařízení, především generátoru. Dalším důvodem je potřeba regulace otáček, abychom se pohybovali kolem jmenovité hodnoty počtu otáček, kde se dosahují nejlepší účinnosti výroby.

Prakticky existují dva způsoby:

- Stall regulace
- Pitch regulace

Stall regulace

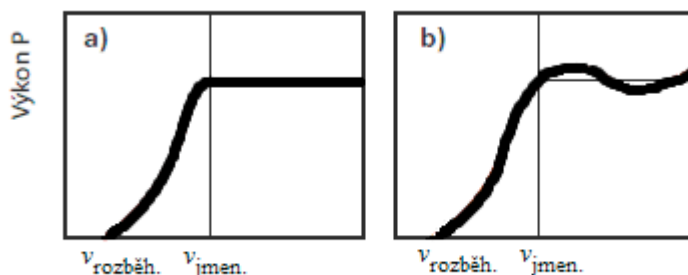
Stall regulace je regulace odtržením proudu toku větru na listech vrtule s konstantním úhlem nastavení listů. Velkou výhodou je především jednoduchá konstrukce, protože nemají systém nastavení listů jako pitch regulace. Regulace stall má minimální nároky na údržbu a vysokou spolehlivost regulace. Mezi významné nevýhody patří nutnost přesného a jemného nastavení listů, nemožnost vrtule samostatně se rozeběhnout. Další nevýhoda je, že při vysokých rychlostech větru, výkon vrtule klesá a tím klesá i účinnost. Větrné elektrárny s tímto druhem regulace se vyrábějí do výkonu 1 MW.

Pitch regulace

Pitch regulace je regulace za pomoci natáčení listů. Navíc se pomocí natáčení dají listy nastavit do tzv. praporu, listy pak kladou minimální odpor. Působící síla pak je co nejmenší, toto se využívá jako brzda a také především jako ochrana při extrémních rychlostech větru. U stall regulace se jedná prakticky o pasivní systém, oproti tomu je pitch regulace aktivní systém se zpětnou vazbou. Tato zpětná vazba je signál o aktuálním výkonu generátoru. Dojde-li tedy k překročení jmenovitého výkonu listy se nastaví tak, aby se dosáhlo opět jmenovité hodnoty výkonu.

Hlavní výhody pitch regulace je jednoduchý start rotoru, možnost brzdění, aktivní kontrola výroby v celém rozsahu rychlostí větru. Zásadní nevýhoda je komplikovaná konstrukce vrtulové hlavy, kterou je nutno navrhnout tak aby se daly natáčet listy vrtule.

Porovnání obou dvou druhů regulace, lze zobrazit na výkonové křivce, kterou zobrazuje obrázek (Obr.1.5), kde na ose x je rychlost větru a na ose y výkon. Na křivce je patrné, že nad jmenovitou hodnotou rychlosti větru je výkon u pitch regulace konstantní, u stall regulace ne.



Obr.1.5. – Výkonová křivka a) pitch regulace b) stall regulace [3]

Existuje i třetí varianta regulace větrných motorů, ta se označuje active stall, jedná se určitou kombinací obou systémů. Jedná se také o regulaci pomocí natáčení listů vrtule, avšak rozsah tohoto natáčení není tak velký jako u pitch regulace. Regulace je v počátku shodná s pitch regulací, ale

v režimu udržování konstantního výkonu se úhly zmenšují a regulace je způsobena odtržením proudu větru, jako u stall regulace. [1] [3] [4]

1.1.4. Energie větru

Vítr je pohyb vzduchu, který způsobuje rozdíl atmosférického tlaku. Rozdíl tohoto tlaku je dán různými hustotami vzduchu a ty jsou dány různými teplotami. Proudění tohoto vzduchu je z míst s vyšším tlakem do míst s nižším tlakem a tímto rozdílem je dána i závislost rychlosti větru.

Vítr si tedy můžeme představit, jako pohybující se těleso a pro každé těleso platí základní vztah pro mechanickou energii (1.1)

$$E = E_K + E_P, \quad (1.1)$$

kde E je celková mechanická energie, E_K je kinetická energie a E_P je potenciální energie.

Kinetická energie E_K je přímo úměrná hmotnosti m a kvadrátu rychlosti v , potenciální energie E_P je přímo úměrná hmotnosti m , gravitačnímu zrychlení g a výšce h , platí vztahy (1.2) a (1.3):

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2, \quad (1.2)$$

$$E_P = m \cdot g \cdot h. \quad (1.3)$$

Pro celkovou mechanickou energii pohybujícího se větru lze říci, že se skládá jen z kinetické energie, protože energii na rotoru větrného motoru způsobuje energie přenesená rychlostí větru a tak platí, že celková mechanická energie je rovna kinetické energii a lze konkrétně psát:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2, \quad (1.4)$$

kde m je hmotnost vzduchu a v rychlost vzduchu.

Jelikož lze všeobecně zapsat hmotnost, jako součin hustoty a objemu, lze tento vztah použít i konkrétně na hmotnost vzduchu:

$$m = \rho \cdot V, \quad (1.5)$$

kde ρ je hustota vzduchu a V objem. Jelikož objem lze zapsat jako součin plochy podstavy a výšky, lze objem nahradit vztahem (1.6) a následně nahradit hmotnost vzduchu ve vztahu (1.4) vztahem pro hmotnost (1.7).

$$V = A \cdot s \quad (1.6)$$

$$m = \rho \cdot A \cdot s \quad (1.7)$$

Pokud provedeme výše uvedené matematické operace získáme vztah pro energii větru:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2, \quad (1.8)$$

kde ρ je hustota větru, A plocha kterou teče vítr, s dráha větru a v rychlost větru.

Za použití vztahu pro průměrný výkon (1.9), lze určit vztah pro výkon protékající jednotkovou plochou:

$$P = \frac{E}{t}, \quad (1.9)$$

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t}, \quad (1.10)$$

kde P_v je výkon vztažen na jednotkovou plochu, E energie větru, A plocha a t čas. Pokud do vztahu (1.10) dosadíme vztah pro energii větru (1.8) vyjde:

$$P_v = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2}{A \cdot t}, \quad (1.11)$$

následnou matematickou úpravou vztahu:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^2}{t}, \quad (1.12)$$

jelikož nepočítáme v okamžitých hodnotách, ale v průměrných hodnotách, lze pro průměrnou rychlost psát vztah (1.13):

$$v = \frac{s}{t}. \quad (1.13)$$

Pokud tento vztah (1.13) dosadíme do vztahu (1.12) získáme vztah pro výkon vztažený na jednotkovou plochu. Tento výkon je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti vzduchu:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1.14)$$

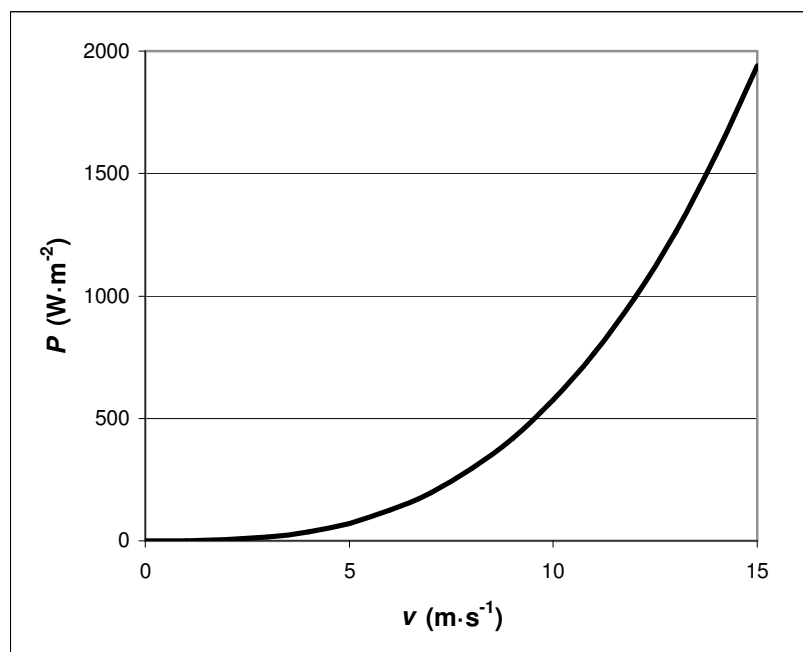
kde ρ je hustota větru a v rychlost, pokud do toho vztahu dosadíme v základních jednotkách tzn. hustotu v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a rychlost v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ vyjde nám výkon ve $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ tzn. jaký výkon protéká plochou 1 m^2 .

Průběh tohoto výkonu zobrazuje graf (Obr.1.6), tato závislost je vypočtena pro hustotu vzduchu $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, z grafu je patrné že výkon větru rychle roste s rostoucí rychlostí větru. Pozor zde se jedná o maximální dosažitelný výkon větru, nikoliv celé větrné elektrárny.

Pokud vztah (1.14) vynásobíme plochou vrtule A_{VM} dostaneme obecný vztah pro výpočet výkonu větrného motoru (1.15)

$$P_{VM} = \frac{1}{2} \cdot A_{VM} \cdot \rho \cdot v^3, \quad (1.15)$$

kde P_{VM} (W) je výkon větrného motoru,
 A_{VM} (m^2) je plocha rotoru větrného motoru,
 ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota vzduchu,
 v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je rychlost vzduchu.



Obr.1.6 - Závislost výkonu větru na jeho rychlosti

Ze vztahu (1.15) je vidět že výkon větru závisí na třech parametrech. Na hustotě větru, rychlosti větru a ploše rotoru, rychlost větru lze jednoduše změřit, například za pomoci anemometru. Plochu rotoru větrného motoru se svislou osou otáčení lze vypočítat z délky vrtulového listu podle vztahu (1.16)

$$A_{VM} = \pi \cdot r^2, \quad (1.16)$$

kde A_{VM} je plocha rotoru a r je délka listu vrtule (poloměr opisované kružnice).

Stanovení hustoty větru

Hustota vzduchu je závislá na tlaku a termodynamické teplotě, proto lze hustotou stanovit pomocí vztahu:

$$\rho = \frac{p_b}{r \cdot T}, [1] \quad (1.17)$$

kde p_b je barometrický tlak, r plynová konstanta (pro vzduch je $r = 278 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a T je termodynamická teplota, protože termodynamická teplota T je v Kelvinech a většinou se měří teplota t ve °C je nutné tuto teplotu přepočítat:

$$T = 273,15 + t. \quad (1.18)$$

Výsledný vztah pro hustotu vzduchu je:

$$\rho = \frac{p_b}{r \cdot (273,15 + t)}, \quad (1.19)$$

pokud tento vztah dosadíme do vztahu(1.15) pro výkon větrného motoru:

$$P_{VM} = \frac{1}{2} \cdot A_{VM} \cdot \frac{P_b}{r \cdot (273,15 + t)} \cdot v^3. \quad (1.20)$$

Barometrický tlak závisí na výšce umístění rotoru nad hladinou moře. Například ve výšce $h = 1600$ m má tlak hodnotu 82% oproti tlaku na hladině moře. Tlak na výšce závisí podle vztahu (1.21):

$$p_{b(h)} = p_{b(0)} \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} \cdot h + 0,5291 \cdot 10^{-8} \cdot h^2), [1] \quad (1.21)$$

kde $p_{b(h)}$ barometrický tlak ve výšce h , $p_{b(0)}$ je tlak vzduchu na hladině moře a h je výška od moře.

Ze vztahů (1.20) a (1.21) je vidět, že výkon větrného motoru je závislý na rychlosti v , teplotě t a výšce h . Hodnoty plynové konstanty r a tlaku vzduchu na hladině moře $p_{b(0)}$ považujeme za konstantní.

Stanovení energie větru

Jelikož výkon P_v a rychlost větru v je časově závislá lze pro okamžité hodnoty psát:

$$E_v = A \cdot \int_{t_0}^t P_v \cdot dt, \quad (1.22)$$

Vztah (1.22) přesně spočítá energii získanou z větru a započítá tak i krátkodobé zakolísání výkonu. [1]

1.1.5. Betzova teoretická účinnost

Základním principem funkce větrného motoru, který slouží k přeměně energie větru na energii mechanickou, je zpomalení proudu vzduchu, který protéká danou plochou vrtule, při tomto zpomalení se, z celkové energie větru, část energie odebere.

Na obrázku (Obr.1.7) je nakreslen ideální průchod větru ideálním větrným motorem. V tomto ideálním průchodu větru se neuvažuje míšení proudů větru a proud je omezen dvěma svislými plochami 1 a 2, v těchto plochách má vítr rychlosti v_1 a v_2 a protéká plochami A_1 a A_2 . Na vrtuli je rychlost větru v a protéká plochou A . V prostoru, který je takto ohraničen plochami, se nepřenáší energie, a platí tak rovnice kontinuity (1.23):

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2, \quad (1.23)$$

ze zákona o zachování hybnosti lze odvodit axiální sílu působící na rotor (1.24) a výkon (1.25):

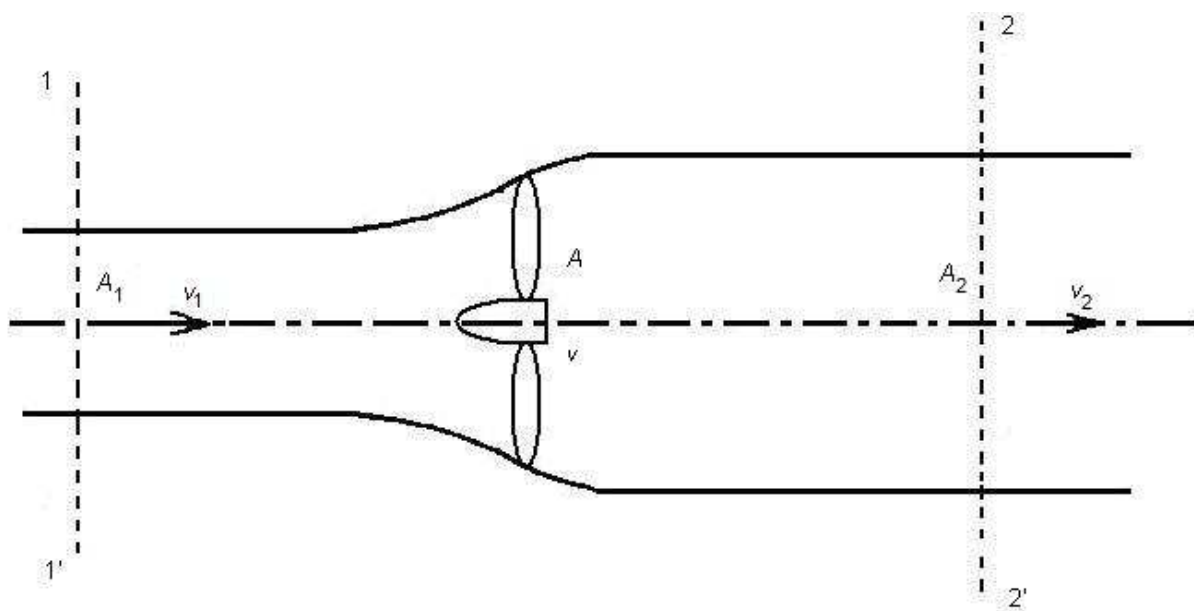
$$F_a = \rho \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \cdot A, \quad (1.24)$$

$$P = F_a \cdot v = \rho \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \cdot A. \quad (1.25)$$

Pokud vypočítáme výkon ze změny kinetické energie proudu větru proleklého za 1 sekundu vztah (1.26), za energii dosadíme vztah (1.4) a vynásobíme plochou A (výkon ve Wattech) dostaneme vztah (1.27):

$$P = \frac{\Delta E_k}{t}, k \quad (1.26)$$

$$P = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot A}{t} \quad (1.27)$$



Obr.1.7 – Průchod ideálního větru ideálním větrným rotorem [1]

Do vztahu (1.27) lze dosadit vztahy pro hmotnost (1.7) a průměrnou rychlost (1.13):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot A \quad (1.28)$$

Pokud porovnáme rovnice (1.25) a (1.28), pak pro výpočet rychlosti větru na vrtuli vyplývá:

$$\rho \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \cdot A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot A, \quad (1.29)$$

$$v \cdot (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2), \quad (1.30)$$

$$v = \frac{1}{2} \cdot \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{(v_1 - v_2)}, \quad (1.31)$$

a jelikož platí $(A^2 - B^2) = (A + B) \cdot (A - B)$ lze psát:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (1.32)$$

Axiální síla působící na rotor a výkon pak bude:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot A, \quad (1.33)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \cdot A. \quad (1.34)$$

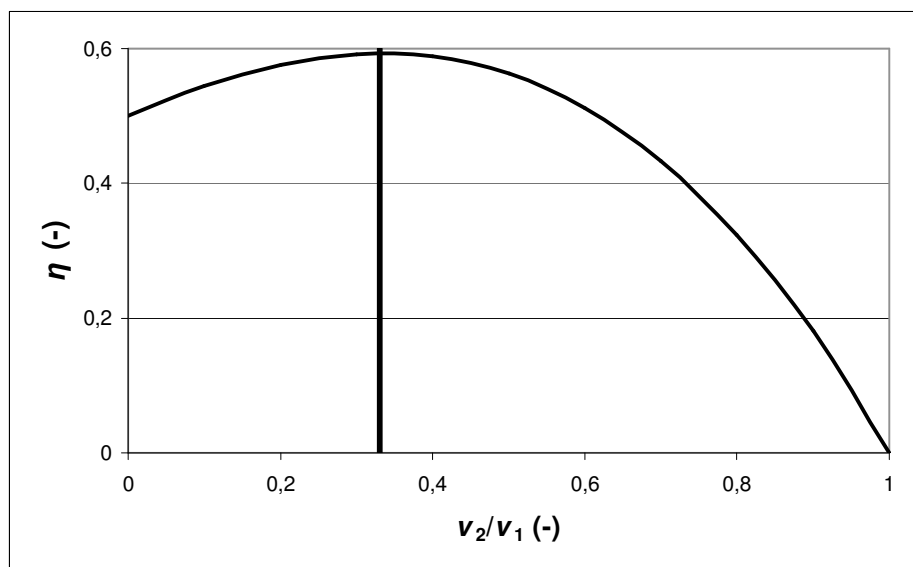
Tento výkon (1.34) lze vyjádřit do poměru s výkonem větru (1.15). Vznikne tím ideální účinnost přeměny kinetické energie větru na energii mechanickou, ale za předpokladu ideálního rotoru (nekonečný počet nekonečně tenkých lopatek s nulovým aerodynamickým odporem a vztakový princip).

$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{2 \cdot v_1^3} \cdot [1] \quad (1.35)$$

Závislost účinnosti pro různé poměry rychlosti v_2/v_1 zobrazuje obrázek (Obr.1.8). Pomocí derivování funkce účinnosti η_i podle rychlosti v_2 . Výpočtem lze stanovit maximální ideální hodnotu účinnosti, která nastává při poměru $(v_2/v_1) = 1/3$ a její velikost je $\eta_i = 59,3 \%$. Tato účinnost se označuje jako Betzova účinnost, kterou odvodil Albert Betz v roce 1919. Pak lze pro mechanický výkon na hřídeli psát:

$$P_{VM} = \frac{1}{2} \cdot k_b \cdot A_{VM} \cdot \rho \cdot v^3, \quad (1.36)$$

kde P_{VM} je mechanický výkon větrného motoru, k_b koeficient Betzovi účinnosti, A_{VM} je plocha rotoru, ρ hustota vzduchu a v rychlost proudění větru.



Obr.1.8 - Závislost ideální účinnosti na poměru rychlostí v_2/v_1

Tab.1.1 - Hodnoty výkonového součinitele C_P pro vybrané typy větrných motorů

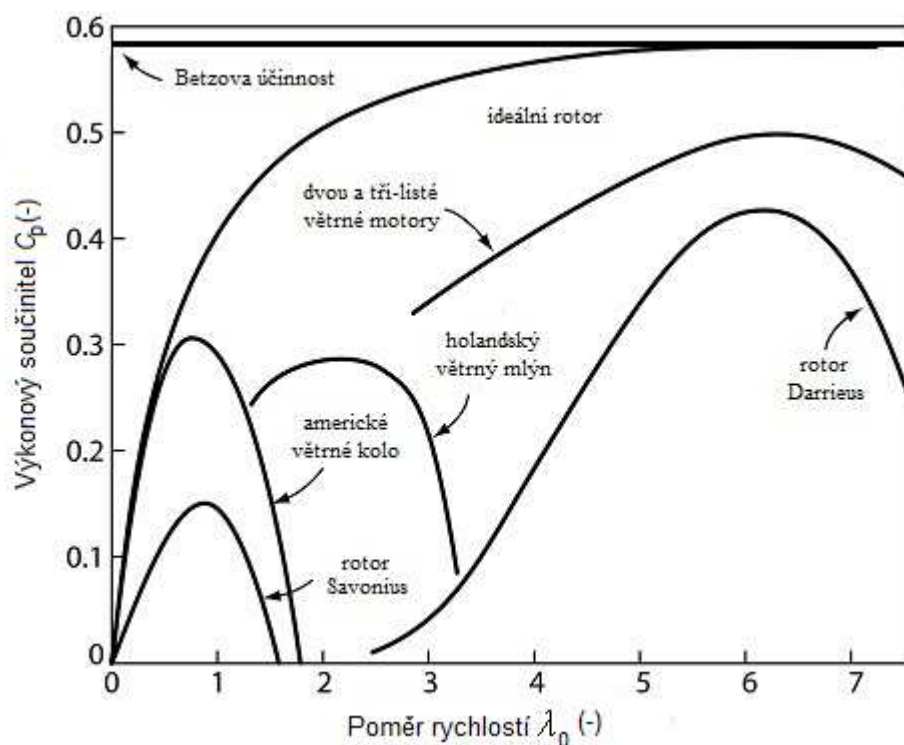
Typ větrného motoru	C_P
Mnoholopatkový rotor (americký)	0,35
Třílistý rotor	0,18 - 0,39
Dvoulistý rotor	0,20 - 0,48
Savonius	0,23
Darrieus 3-listý	0,362
Darrieus 1-listý	0,236
Miskový kříž	0,0195

Hodnota Betzovy účinnosti je maximální možná účinnost přeměny energie větru na mechanickou energii. Reálné větrné motory mají tuto účinnost přeměny nižší. Záleží na konkrétním typu rotoru a navíc platí pro rotory na vztakovém principu.

Pro reálné větrné hodnoty se určuje tzv. výkonový součinitel C_P , který udává poměr výkonu rotoru k výkonu větru. Pro různé typy větrných motorů jsou zobrazeny v tabulce (Tab.1.1). Výkonový součinitel je však závislý na poměru obvodové rychlosti rotoru k rychlosti větru, poměr se označuje λ_0 ,

tato závislost je vykreslena v grafu (Obr.1.9). Tímto výkonovým činitelem, lze nahradit Betzův koeficient účinnosti (1.36), tím dostaneme přibližný výkon konkrétního větrného motoru.

Existují i další teorie pro určení účinnosti přeměny energie větru na mechanickou energii, ale tyto teorie se nerozšířily. [1]



Obr.1.9 - Průběh výkonového součinitele C_p [17]

1.1.6. Větrné elektrárny

Větrná elektrárna se skládá z větrného motoru, elektrického generátoru a dalších zařízení, potřebných pro chod celé elektrárny. Celé větrné elektrárny jsou dodávány od různých společností, které do větrných elektráren montují vlastní zařízení a technologie pro optimální provoz elektráren. Tyto zařízení a technologie, každý výrobce nazývá různě, ale vždy se jedná o takové zařízení které optimalizuje chod větrného motoru, převodovky, generátoru a dalších zařízení, pro nejlepší využití energie větru.

Větrné elektrárny lze dělit podle řady možností, základní rozdělení lze udělat podle typu větrných motorů: vztahové nebo odporové, se svislou osou otáčení nebo s vodorovnou osou otáčení, jaká je použita regulace větrného motoru. Další možností je dělení zda má elektrárna mezi větrným motorem a generátorem převodovku, nebo nemá. Zda je použit synchronní generátor nebo asynchronní generátor. Také se používá standardizované dělení podle velikosti a výkonu (Tab.1.2).

Tab.1.2 – Dělení větrných elektráren podle velikosti a výkonu

malé větrné elektrárny		střední větrné elektrárny		velké větrné elektrárny	
průměr do (m)	výkon do (kW)	průměr do (m)	výkon do (kW)	průměr do (m)	výkon do (MW)
8	10	22	130	64	1,5
11	25	32	310	90	3,1
16	60	45	750	128	6,4

Převodovky

Tradičně se ve větrných elektrárnách používá klasická mechanická převodovka. Ta přeměňuje nízkou obvodovou rychlost na vyšší otáčky, které potřebují generátory s nižším počtem pólů. Naopak bezpřevodovkové elektrárny jsou novější, převodovku nepotřebují. Generátory těchto elektráren mají vyšší počet pólů a stačí jim nižší otáčky. Hlavní výhodou bezpřevodovkových gondol je nižší váha, menší počet mechanických částí, menší rozměry a nižší cena. Tím že je nižší hmotnost gondoly, která má i menší rozměry, je mnohem jednodušší takovou gondolu natáčet na sloupu. Menší počet mechanických částí je výhodný pro snížení poruchovosti. Hlavní nevýhodou je velikost vícepólového generátoru při vyšších výkonech.

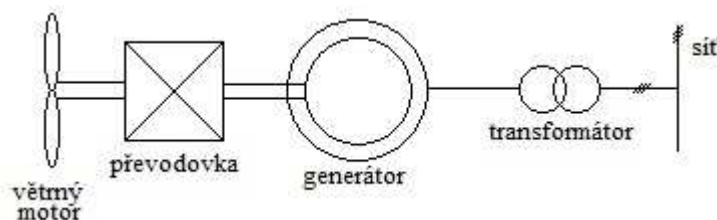
Převodovku je nutné správně navrhnout. Její návrh záleží na výkonu elektrického generátoru který na ni bude napojen. Existuje spousta konstrukčních řešení. Pro malé výkony se používají více hřídelové převodovky. Pro velké výkony se používají planetové převodovky. Hlavními ukazateli převodovek je účinnost a hlučnost. Účinnost převodovek je velmi vysoká, záleží na konstrukci a použitých mazivech. Malé více hřídelové převodovky se podílejí na ztrátě výkonu kolem 2 %, velké planetové převodovky mají ztrátu kolem 1 %. Hlučnost převodovek je kolem 80 dB u malých výkonů kolem 100 kW, u výkonů nad 1 MW se hlučnost pohybuje kolem 85 dB. Převodovky se dnes vyrábějí s dlouhou dobou životnosti, kolem 20 let a také minimální potřebou na výměnu oleje.

Generátory

V elektroenergetice rozlišujeme dva druhy generátorů elektrické energie, synchronní a asynchronní generátor. Spolu s větrným motorem tvoří nejdůležitější součást větrné elektrárny. Oba dva druhy generátoru se v případě nízké rychlosti větru, kdy se větrná elektrárna sama nedokáže rozeběhnout, použijí jako motor. Následně se přejde do generátorického režimu a elektrárna začne elektřinu vyrábět. Účinnost elektrických generátorů je kolem 70 % u malých generátorů o výkonu v desítkách kW. U generátorů velkých výkonů je účinnost až 95 %, zde se jedná už o výkony v jednotkách MW. Rozdíl mezi synchronním a asynchronním generátorem je velmi malý, asynchronní generátor má účinnost maximálně o 2 % nižší než synchronní generátor.

Použití jednoho nebo druhého typu generátoru má svoje výhody a nevýhody. Jejich použití závisí i na připojení do elektrické sítě. Nejdříve se používalo přímé připojení do sítě (Obr.1.10), schéma je shodné pro oba druhy generátoru. V případě synchronního generátoru se toto zapojení používalo především dříve v USA, jalový výkon byl regulován pomocí buzení na generátoru. Nebylo tak nutné používat přídatné zařízení. Bylo ale nutné použít synchronizační zařízení pro připojení na síť. Při velkých úhlech zatížení vznikaly velké rázy.

Naopak asynchronní generátory toto zapojení používaly velmi často, především třílisté vrtule se stall regulací používaly toto zapojení po řadu dekád. Skluz generátoru zde zajišťoval připojení k síti. Pomocí tyristorů byla prováděna kontrola úhlu, která zabráňovala rázovému úhlu. Na kompenzaci jalového výkonu se používaly připojené kondenzátory. Opět zde byly připojeny synchronizační zařízení. Nevýhoda byla klesající účinnost na skluzu a bylo nutné řešit rozptyl tepla, které vznikalo s rostoucím skluzem.

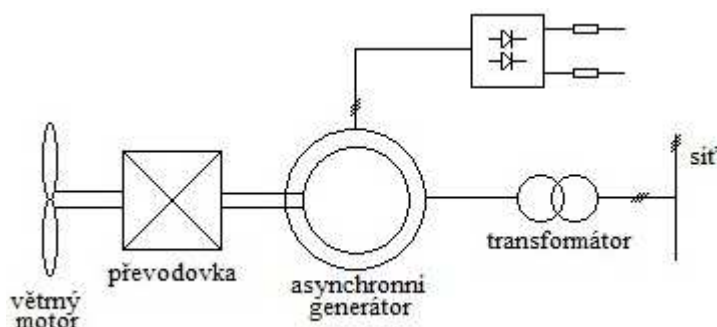


Obr.1.10 – Přímé připojení větrné elektrárny na síť [4]

Rozvojem větrné techniky a elektronických součástek se výrobci větrných elektráren snažili řešit problematiku připojení elektráren do sítě. Jednou z možností bylo připojení odporů do rotorového obvodu asynchronního generátoru (Obr.1.11). Tento systém se u firmy Vestas označoval jako Optislip. Jednalo se o dynamický systém na kontrolu skluzu, připojené odpory umožňovaly řídit souběh

rychlostí a dodržet podmínky provozu. Odpory způsobovaly snížení účinnosti asi jen o 2 až 3 procenta.

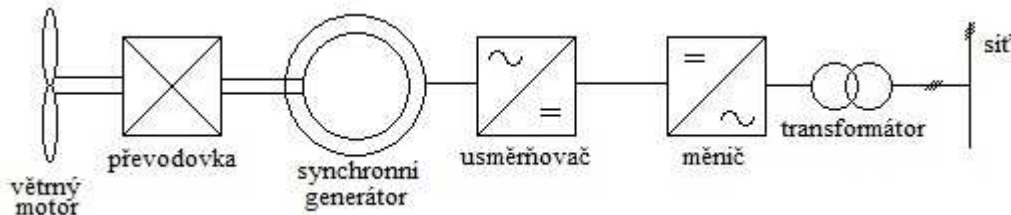
Další možností bylo použít 2 generátory, jeden na nižší rychlosti, druhý na vyšší. To se nadále vyvinulo na generátory s přepínatelným počtem pólů.



Obr.1.11 – Větrná elektrárna s kontrolou skluzu[4]

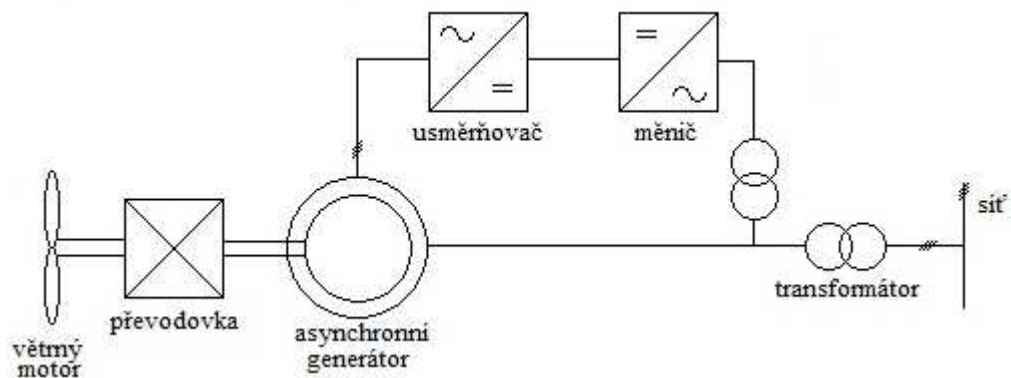
Všechny tyto systémy připojení nahradily generátory, které pracují s proměnlivými otáčkami. Vyrobená elektrická energie jde do usměrňovače a následně do měniče kde je vyráběno harmonické napětí o frekvenci 50 Hz. V tomto zapojení se používají oba dva druhy generátorů, hlavní problémem bylo udržet kvalitu elektrické energie z ohledem na vyšší harmonické. Dřívější 6-pulsní měniče nahradily 12-pulsní, nové měniče používají moderní tranzistory IGBT.

U synchronního generátoru se používá zapojení (Obr.1.12) usměrňovač, stejnosměrná cesta a střídač, ten je pak napojen elektrickou sítí. Nenastává zde problém se synchronizací do sítě, většina negativních vlivů byla spojena s kvalitou elektrické energie, ty však byly odstraněny pomocí moderní elektroniky.



Obr.1.12 – Synchronní generátor se stejnosměrnou linkou[4]

Asynchronní generátor má zapojený usměrňovač a měnič v kaskádním zapojení (Obr.1.13), to umožňuje řídit elektrické točivé pole řízením proudu ve stejnosměrné lince. Generátor tak pracuje vždy s vyššími otáčkami než jsou synchronní. Problémem zde je jalová energie, ta je však kontrolována řídicím systémem. [3][4]



Obr.1.13 – Asynchronní generátor v kaskádním zapojení[4]

1.2. Teoretické základy solárních elektráren

Slunce je už od pradávna základním zdrojem energie na Zemi. Sluneční energie má největší potenciál pro člověka. Člověk dokáže sluneční energii využívat dvěma způsoby, pasivně a aktivně. Mezi pasivní využití patří například orientace okna na jih, tím získáme určitý energetický zisk. Významnou měrou je dnes aktivní využívání sluneční energie, ohřev vody pomocí solárních kolektorů, výroba elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů, a podobně.[6]

1.2.1. Slunce a využití energie

Slunce je pro člověka životodárný zdroj energie, bez Slunce by na Zemi neexistoval život. Lidstvo bralo Slunce vždy jako samozřejmost. Vědecky se o podstatě světla začíná bádát až v 17. století. Rozvojem vědeckého pokroku a především teorie elektromagnetických bylo zjištěno, že světlo jsou příčné elektromagnetické vlny v úzkém oblasti vlnových délek, a projevují se jako tok fotonů.[8]

Dalším významným krokem k využívání slunce se stala fotovoltaika, přímá přeměna sluneční energie na elektrickou energii. Historie fotovoltaiky začíná v 19. století, kdy Alexander Edmond Becquerel zjistil přírůstek napětí na chemických článcích, které vystavil slunečnímu záření. V roce 1876 se tento jev prokázal u selenu. V roce 1883 Charles Fritz sestrojil selenový fotočlánek. Stále však tento jev nedokázal nikdo vysvětlit. Tento jev, nazvaný fotoefekt, dokázal vysvětlit až Albert Einstein, který za něj v roce 1921 dostal Nobelovu cenu. V 50. letech minulého století začal rozvoj polovodičů. Základem se stal křemík, a tak se v roce 1954 v Bellových laboratořích objevil první křemíkový fotočlánek. Jeho vývoj trvá dodnes.[2]

Energie ve Slunci

Z fyzikálního hlediska je Slunce obrovský fúzní reaktor, termojaderná fúze spočívá ve slučování atomů vodíku H do atomů helia He, tato reakce se označuje jako proton-protonový řetězec, při této reakci vzniká energie 26 MeV. Tato energie je pak unášena pomocí fotonů a neutrin. Fotony na Zemi pak sledujeme jako sluneční záření.[6]

Ze Slunce se na Zemi dostane jen malý zlomek této zářivé energie, jedná se asi o půl miliardtiny, tento zlomek energie putuje 150 milionů kilometrů, za přibližně 8,3 minuty, na povrch Země. Měřením byla zjištěna nejvyšší možná hodnota výkonu dopadající zářivé energie, označována jako solární konstanta. Její velikost je $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a určuje maximální možný dosažitelný výkon na Zemi před průchodem slunečního záření atmosférou.[7]

Při průchodu slunečního záření atmosférou část záření projde, část je atmosférou absorbována a část se odrazí. Vzniknou tedy určité ztráty. Tyto ztráty se dají přibližně vyjádřit i číselně, absorpci se ztratí kolem $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a rozptylem přibližně $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Na povrch Země tak dopadají dvě složky přímé záření a difúzní záření. Přímé záření je přímo dopadající záření na povrch, které lze koncentrovat například pomocí zrcadel nebo čoček. Difúzní záření vzniká při rozptylu slunečního záření v atmosféře, nelze ho nijak směřovat, protože přichází ze všech směrů. Součet těchto složek se nazývá globální záření. Solární zařízení je tak nutné navrhnout, aby využívalo i difúzní záření, jehož podíl v celoročním průměru se pohybuje mezi 50 - 70 %.[6][7]

1.2.2. Principy využití sluneční energie

Využívání sluneční energie má spoustu výhod. Sluneční energie je především zadarmo, je to čistý ekologický zdroj a navíc nevyčerpatelný. Principy využití slunce lze dělit na dva základní systémy:

- Pasivní systémy
- Aktivní systémy

Pasivní systémy

Jako pasivní systém si můžeme představit objekt, který svou obalovou konstrukcí získává určitou energii ze slunečního záření. Například skleníky, prosklené části budov, ale také akumulace tepla do zdí a následný posun tepla do interiéru. Toto se výrazně uplatňuje v architektuře, kdy si zvětšením podílu zasklení na jižní stranu zhoršíme tepelnou charakteristiku budovy, ale získáme určitý tepelný zisk ze solární energie.

Aktivní systémy

Aktivní systémy mají oproti pasivním systémům sběrač, což je zařízení, které sbírá zářivou energii a mění ji na tepelnou energii fototermální cestou. Takovéto teplo se pak zužitkuje k topení, ohřevu vody. Prakticky se jedná o solární kolektory, jejich činnost je známa již delší dobu a dosahuje se dobrých účinností. Aktivní systémy lze však využít i na výrobu elektrické energie.

Vyrábět elektrickou energii za pomoci sluneční energie lze dvěma způsoby:

- Nepřímá výroba
- Přímá výroba

Nepřímá výroba

Nepřímá výroba spočívá v koncentraci slunečního záření pomocí sběrače neboli absorberu, v kterém se ohřívá pracovní médium, které následně pohání parogenerátor, který vyrábí elektrickou energii. Princip je tak shodný s klasickou tepelnou elektrárnou, tady se jako primární zdroj používá sluneční energie namísto uhlí. Tyto elektrárny se pak označují jako solární elektrárny.

Přímá výroba

Přímá výroba spočívá v tzv. fotoelektrickém jevu, jedná se o přímou přeměnu sluneční energie na elektrickou energii. Fotoelektrický jev probíhá v tzv. fotovoltickém článku, ten je na polovodičovém principu. Tyto elektrárny se označují, jako fotovoltické elektrárny.[6]

1.2.3. Solární elektrárny

Solární elektrárny jsou elektrárny, které vyrábějí elektrickou energii nepřímo. Princip spočívá v ohřátí nosného média. Toto médium pak v energetické jednotce ohřeje vodu na páru a výroba elektrické energie probíhá v parogenerátoru. Princip je tedy prakticky shodný s tepelnými elektrárnami. Jediný rozdíl je, že se teplo získává ze Slunce, nikoliv spalováním fosilních paliv. Účinnost těchto elektráren se pohybuje kolem 10 %. Hlavním požadavkem pro výstavbu takovýchto zdrojů elektrické energie je umístění ve vhodné lokalitě, lokality musí mít co největší počet slunečných dní v roce. Takovéto lokality se nacházejí v Kalifornii, Arizoně, Egyptě a Indii. V Evropě se, jako vhodné lokality ukazuje Španělsko a Kréta. V některých těchto místech vznikají, nebo se již provozují různé typy solárních elektráren. V základu existují čtyři principy:

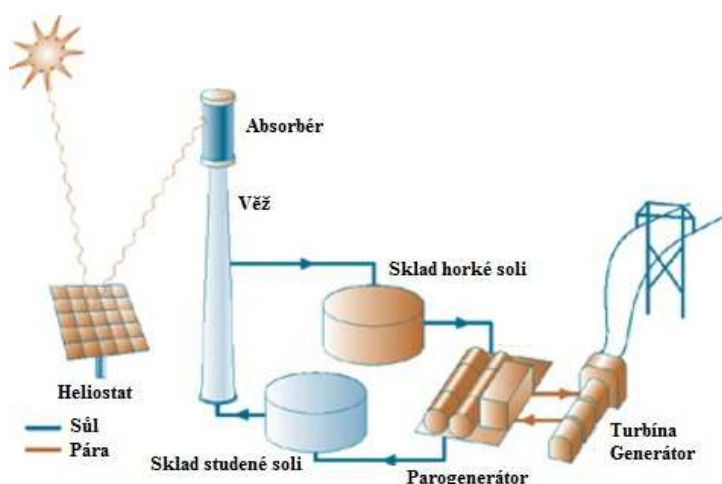
- Solární věže
- Solární žlaby
- Solární talíře
- Solární komíny

Solární věže

Solární věžové elektrárny (Obr.1.14) se skládají z velkého počtu zrcadel, které se nazývají heliostaty. Heliostaty koncentrují sluneční paprsky do jednoho místa, na tomto místě, které je umístěného na vysoké věži, je zařízení nazývané absorber. Heliostaty jsou počítačově řízeny, aby

sledovaly denní pohyb Slunce. Hlavním důvodem je samozřejmě co nejvíce využít sluneční energii. V absorběru se ohřívá vhodně zvolené pracovní médium na teploty od 500 °C až 1500°C, jako vhodné pracovní médium se ukazuje olej nebo mletá sůl, následně se v energetické jednotce ohřívá voda na páru, pomocí tepla z média, které je přivedeno z absorběru. Pára už pak pohání turbínu na které je připojen elektrický generátor. Ohřáté médium se také skladuje ve speciálních zásobnících, pro využití sluneční energie v noci.

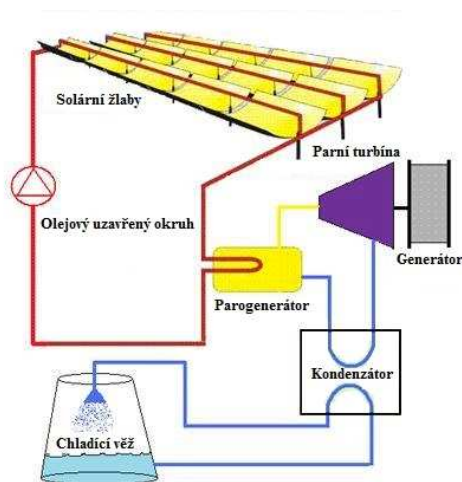
Největším problémem je samotné řízení heliostatů i za pomoci počítačem přesného řízení nutné pro efektivní chod celé elektrárny, přesnost nastavení úhlu musí být $\leq 0,1^\circ$. Dalším problémem je nutnost zrcadla čistit a při velkých plochách je problém jejich odolnost proti větru.



Obr.1.14 – Solární věžová elektrárna [18]

Solární žlaby

Solární žlabové elektrárny (Obr.1.15) pracují na obdobném principu, jako věžové elektrárny. Hlavním rozdílem je koncentrace sluneční energie. Sluneční záření se koncentruje pomocí žlabů, což je vlastně parabolické podlouhlé zrcadlo. V ohnisku těchto žlabů se vedou trubky, v nichž se ohřívá pracovní médium až na teplotu 300 °C, které se opětovně použije k výrobě páry a následně elektrické energie. Jako pracovní médium se používá voda nebo olej. Tyto solární žlabové elektrárny se velmi rozšířily a jsou funkční i jako komerční zdroje elektrické energie, na rozdíl od jiných solárních elektráren, které jsou spíše vědeckého charakteru. V Kalifornii existuje elektrárna dosahující výkonu 354 MW. Solární elektrárny tohoto typu vyrábějí přibližně 90 % elektrické energie ze všech solárních elektráren (sem nepatří fotovoltaika).



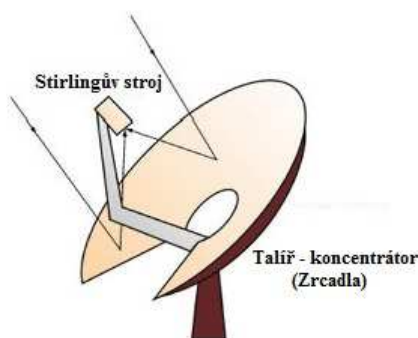
Obr.1.15 – Solární žlabová elektrárna [19]

V Německu vznikl projekt o výstavbě jedné obrovské solární žlabové elektrárny na Sahaře, která by v budoucnu napájela celou Evropu, průměrná roční spotřeba energie v Evropě je 2500000 GWh to by znamenalo rozlohu přibližně 20000 km², elektrárna by zabrala 0,2 % plochy Sahary. Sahara byla vybrána s ohledem na to, že se jedná o neobydlenou a nevyužívanou plochu s velkým ročním počtem slunečních dnů. Dalším problémem tohoto projektu je přenos vyrobené elektrické energie do Evropy.

Solární talíře

Solární talíře (Obr.1.16) jsou variantou k solárním věžím a solárním žlabům, ale s nižšími výkony, výkony talířových solárních elektráren se pohybují od 5 do 25 kW. Existuje řada technických provedení, ale princip je stále stejný, sluneční světlo se usměrňuje pomocí zrcadel do společného ohniska, v ohnisku se dosahuje teplot 600 až 800 °C. Zrcadla mají většinou tvar talíře, od toho je odvozen název těchto elektráren. V ohnisku je tentokrát umístěn Stirlingův stroj, ten slouží k přeměně tepelné energie na kinetickou, ta je pak přeměněna v generátoru na elektrickou energii.

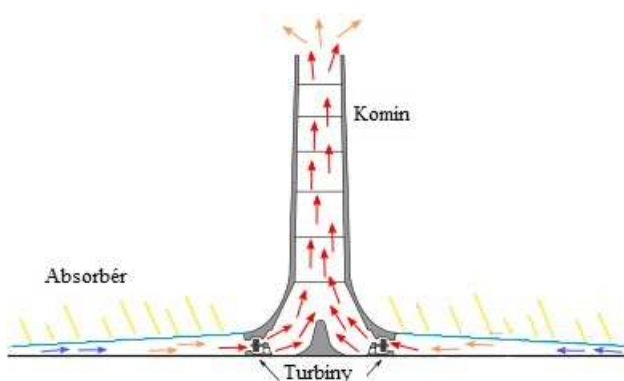
Hlavní nevýhodou těchto elektráren je vysoká investiční cena na kWh oproti solárním věžím a žlabům



Obr.1.16 – Solární talířová elektrárna [20]

Solární komíny

Solární komínové elektrárny (Obr.1.17) využívají komínového efektu, skleníkového efektu a principu větrné turbíny. Elektrárna se skládá z komínu, který je umístěn uprostřed zrcadlové plochy, která slouží jako absorbér. Na tuto plochu dopadá sluneční záření a ohřívá vzduch pod absorbérem. Ohřátý vzduch má nižší hustotu a stoupá komínem vzhůru, tento vzduch pohání turbíny umístěné v komínu. Na nich je napojen elektrický generátor. Celková účinnost tohoto systému je velmi nízká kolem 2 – 3 %.[6][8][10]



Obr.1.17 – Solární komínová elektrárna [21]

1.2.4. Fotovoltaické elektrárny

Fyzikálním základem každé fotovoltaické elektrárny je fotoelektrický jev, při kterém získáváme přímo ze slunečního záření elektrickou energii. Díky přímé přeměně energie se tak celková účinnost zvýší. V ČR se často setkáme s označením solární elektrárna i u elektráren fotovoltaických. V dnešní době se fotovoltaické systémy výrazně rozšířily a staly se nejrozšířenějším principem přeměny solární energie na elektrickou energii. Důvodem je, že vybudovat fotovoltaickou elektrárnu můžeme i na místech, kde není tolik slunečních dnů za rok. Dalším významným aspektem rozšíření fotovoltaických elektráren jsou i výrazné dotace na výrobu elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů. Systémy dotací se liší stát od státu. V ČR se dotace týká zvýšením výkupní ceny za 1 kWh. Státy Evropské Unie se totiž k roku 2010 zavázaly zvýšit svůj podíl vyráběné elektrické energie s obnovitelných zdrojů. Pro Českou republiku je tento podíl 8 % a nadále je nutnost tento podíl zvyšovat. Díky velkému zájmu o fotovoltaické panely tak postupem času jejich pořizovací cena klesala. V období od roku 1975 do roku 2006 se návratnost fotovoltaických elektráren zkrátila na jednu desetinu a cena poklesla dokonce na jednu dvacetinu. U nás se tak zvýšila výstavba nových fotovoltaických elektráren, že ČR musela zakročit k regulaci nové výstavby. Jinak by hrozilo nejen zvýšení ceny elektrické energie, ale i možnost vzniku „blackoutu“ elektrizační soustavy.[2][6][8]

Základem každého fotovoltaického systému je fotovoltaický či solární článek. Jedná se o polovodičový článek většinou na bázi křemíku. Přestože fotoelektrický jev byl objeven i u jiných prvků, křemík patří mezi nejpoužívanější díky svým dobrým vlastnostem. Solární články se jako zdroj elektrické energie začaly používat v kosmickém výzkumu, jako zdroj pro družice a satelity. Díky dobrým zkušenostem ve vesmírných programech a celosvětovém trendu snižování emisí a skleníkových plynů se postupně rozjel vývoj solárních článků. Dnes tak najdeme solární články nejen jako fotovoltaické elektrárny, ale jako zdroj elektrické energie pro kalkulačky, osvětlení, přes různé hračky až po zkušební závodní vozidla. V dnešní době, díky velkému rozšíření, se řeší i možnost akumulace elektrické energie vyrobené ve fotovoltaických elektrárnách. Jelikož solární článek je nejdůležitější zařízením celého systému, je podrobněji popsán v následující kapitole (1.2.5.).[6][9]

Základní solární článek má malý výkon. Maximální výkon jednoho monokrystalického článku se pohybuje kolem 1,5 Wp, výkon u solárních panelů i elektráren se udává ve „Watt-peakách“, což je hodnota špičkového výkonu. Solární článek navíc není nijak chráněn proti okolním vlivům, které by mohly článek poškodit, proto se pro zvýšení výkonu solární články zapojují sériově, paralelně a sérioparalelně do tzv. solárních modulů. Solární moduly navíc obsahují konstrukční řešení, tak aby se zabránilo poškození solárních článků okolními vlivy. Tyto moduly lze pak označit za fotovoltaické panely, z kterých se následně staví fotovoltaické elektrárny. Solární moduly přesněji popisuje jiná kapitola (1.2.6.).[6][10]

Další důležitý prvek fotovoltaických elektráren je měnič, který převádí stejnosměrné napětí na střídavé sinusové napětí, protože fotovoltaický článek vyrábí stejnosměrné napětí. Další komponenty fotovoltaických elektráren jsou rozvaděče, ochrany, měřicí prostředky, kabeláž a úchytný systém, který je někdy doplněn o polohový systém. Podle principu připojení a využití fotovoltaického systému záleží použití konkrétních přídatných zařízení. Fotovoltaické systémy můžeme rozdělit na dva základní systémy z hlediska jestli systém pracuje s distribuční sítí či nikoliv a to na:

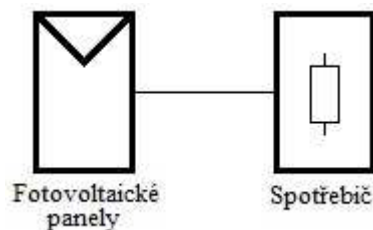
- Ostrovní systém (Grid-off)
- Síťový systém (Grid-on)

Ostrovní systém

Ostrovní systém se označuje jako „Grid-off“ tzn. že není připojen na rozvodnou síť. Používají se především v oblastech, kde není možnost připojení k elektrické přípojce, tzn. samoty, horské chaty, bóje na moři atd. Tyto systémy se rozšířily v rozlehlých zemích, jako jsou USA, Austrálie apod. Někdy se ostrovní systémy nazývají izolovaným systémem, ostrovní systémy lze dále rozdělit na tři podsystémy:

- Grid-off systém s přímým napájením

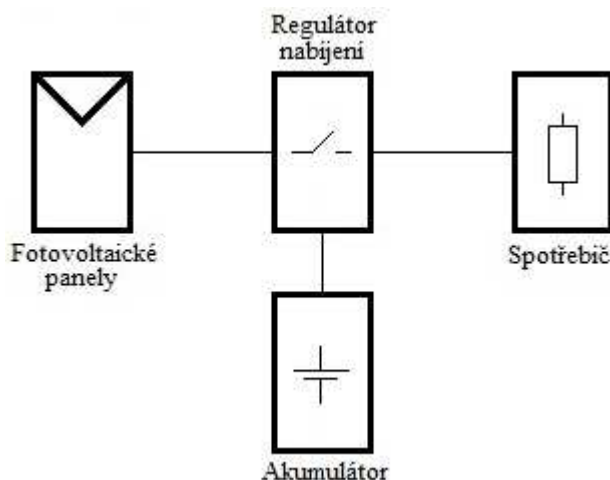
Spotřebič je přímo napojen na fotovoltaický zdroj (Obr.1.18), spotřebič je tak v provozu jen v případě dostatečného slunečního svitu, používá se především na čerpání vody. Většinou se jedná o spotřebiče na napětí 12 a 24 V.



Obr.1.18 – Grid-off systém s přímým napájením

- Grid-off systém s akumulací elektrické energie

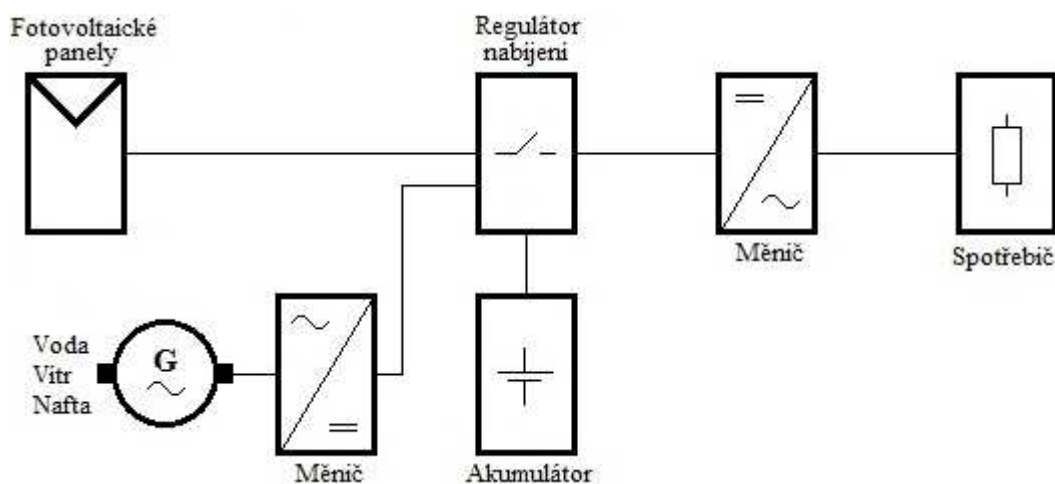
Problém přímého napojení je v tom, že spotřebič mohou využít jen v době, kdy je dostatečná intenzita slunečního záření. Většinu spotřebičů chceme využít i v jiném čase, je nutné energii uchovat na pozdější využití. Toho dosáhneme zapojením regulátoru nabíjení a akumulátoru mezi fotovoltaický panel a spotřebič (Obr.1.19). Tyto systémy jsou buď provozovány stejnosměrně na napětí 12 a 24 V, ale běžně se setkáváme i se střídavou sítí 230 V. Střídavé napětí je vyráběno za pomoci měničů. K akumulaci elektrické energie se využívají různé chemické články, například olověné, NiMH, gelové apod. V současné době se zkoumá možnost akumulace elektrické energie do vodíku.



Obr.1.19 – Grid-off systém s akumulací elektrické energie

- Hybridní Grid-off systém

Dalším problémem fotovoltaiky je fakt, že v zimních měsících vyrábějí panely mnohem méně elektrické energie oproti letním měsícům. V případě, že bychom zvýšili instalovaný fotovoltaický výkon, máme zase naopak v letních měsících velké množství elektrické energie, kterou nemůžeme nijak využít. Navíc náklady na realizaci by byly vysoké. V hybridních systémech se proto připojují buď další obnovitelné zdroje energie, jako malé vodní elektrárny, větrné elektrárny, nebo se použije klasický dieselový generátor. V těchto systémech se používá i akumulace elektrické energie (Obr.1.20).



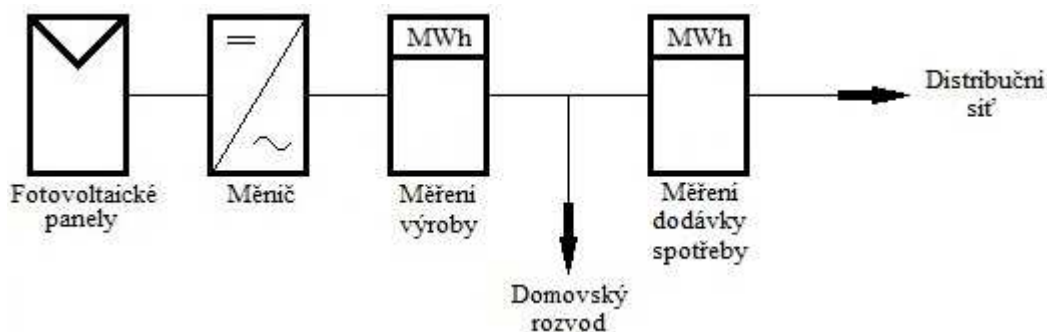
Obr.1.20 – Hybridní Grid-off systém s měničem napětí

Síťový systém

Síťový systém je připojen do distribuční sítě, tento systém se označuje „Grid-on“. Pokud máme elektrárnu napojenou na distribuční síť, můžeme prodávat vyrobenou elektrickou energii, která je dotována zvýšenou výkupní cenou za vyrobenou MWh. Ceny v ČR stanovuje Energetický regulační úřad. Pro připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě je nutné dodržet podmínky provozovatele distribuční sítě. Z hlediska zapojení systému do sítě se dají rozlišit dva druhy připojení:

○ Grid-on systém s využitím zeleného bonusu

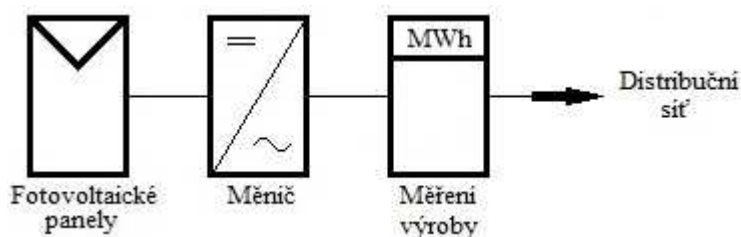
Jedná se o systém vhodný pro malé fotovoltaické elektrárny, které jsou většinou umístěny na střechách nebo fasádách domů. V tomto případě je využit stávající domovský rozvod do kterého je napojen přes měnič fotovoltaický systém. Je zde nižší cena o 1 000 Kč za vyrobenou MWh. To je kompenzováno tím, že se tato cena platí za veškerou vyrobenou elektrickou energii, a to i v případě že tuto energii spotřebují pro vlastní spotřebu domácnosti. Toto je garantováno vyhláškou č.475/2005 sb. V tomto případě se měří vyrobená elektrická energie před připojením do domácího rozvodu, dodávaná elektrická energie do distribuční sítě a odběr z distribuční sítě (Obr.1.21).



Obr.1.21 – Zapojení s využitím zeleného bonusu

○ Grid-on systém se samostatnou přípojkou

V tomto systému je veškerá vyrobená elektrická energie dodávaná přes měnič a elektroměr do distribuční soustavy (Obr.1.22). Systém je vhodný pro fotovoltaické elektrárny většího výkonu, řádově se jedná o výkony od několika desítek kWp. Tyto elektrárny se zapojují do sítí s vyšší hladinou napětí. Pro tyto elektrárny musí být zřízena nová elektrická přípojka. Takovéto elektrárny se většinou staví na nevyužitých plochách a polích, někdy se však jedná i o elektrárny umístěné na velkých budovách.



Obr.1.22 – Grid-on systém se samostatnou přípojkou

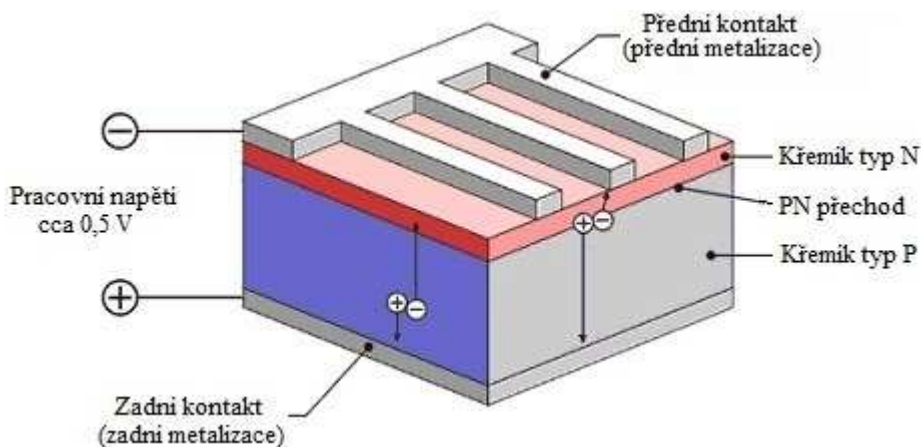
Grid-on systém se samostatnou přípojkou se velmi rozšířil, největším důvodem byla velmi vysoká výkupní cena za vyrobenou MWh a garance ceny po dobu 15 let, cena za 1 MWh vyrobenou ve fotovoltaické elektrárně s výkonem nad 30 kWp připojenou v roce 2010 je 12 400 Kč/MWh, za stejnou elektrárnu připojenou v roce 2011 je už cena 5 900 Kč/MWh. Nově je zřízena cena pro elektrárny s výkonem vyšším než 100 kWp, která je 5 500 Kč/MWh. Hlavním problémem tohoto rozšíření by byla příliš vysoká cena elektrické energie pro odběratele a nedostatečná kapacita elektrických přenosových sítí.[6][10][11][12]

1.2.5. Solární články

Solární články jsou základním prvkem fotovoltaiky. Historie skutečných solárních článků není dlouhá začíná rokem 1954. Tehdy dosahoval článek účinnosti 4,5 % později 6 %. V roce 1958 byla účinnost 9 % a v roce 1960 se zvedla na hranici 14 %. V 70. letech se ustálila účinnost kolem hodnoty 15 %, i když laboratorně se dosáhlo účinnosti přes 30 %, výrobní cena takovýchto článků je příliš vysoká.

Princip solárního článku

Solární článek (Obr.1.23) je plošná polovodičová součástka s jedním nebo i více PN přechody, princip solárního článku je stejný pro různé typy použité technologie. Solární články jsou většinou čtvercové destičky, hrana nebývá větší než 200 mm. Články jsou velmi tenké, tloušťka článku je do 400 μm . Destička má na každé straně takové atomy, aby jedna strana byla kladná a druhá záporná.



Obr.1.23 – Solární článek v řezu [3]

Pokud je solární článek osvětlen, jsou vevnitř buzeny elektrické částice, elektrony a díry se následně separují vnitřním polem PN přechodu a rozdělí se elektrický náboj, výsledkem je pak rozdíl napětí mezi kontakty na destičce. Jelikož solární článek vyrábí stejnosměrný proud můžeme tyto kontakty označit za plus a minus. Při připojení zátěže mezi kontakty poteče zátěží stejnosměrný elektrický proud, který je přímo závislý na intenzitě slunečního záření a ploše solárního článku.

Parametry solárního článku

Solární článek je potřeba charakterizovat, nejdůležitější charakteristika je Volt-Ampérová charakteristika (Obr.1.24), z které lze odečíst nejdůležitější parametry:

- P_{MAX} – maximální výkon solárního článku, označován jako MPP (Maximum Power Point)
- U_{MPP} – napětí při maximálním výkonu
- I_{MPP} – proud při maximálním výkonu
- U_{OC} – napětí naprázdno
- I_{SC} – zkratový proud

Dalším důležitou veličinou je účinnost solárního článku, ta se označuje jako EFF a hodnota záleží na konkrétním typu solárního článku, dále se ještě udává faktor zaplnění FF . Všechny elektrické parametry jsou zjišťovány měření během standardizované zkoušky STC. Při té je článek při teplotě 25 °C vystaven intenzitě slunečního záření $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, složení světla odpovídá spektru $AM = 1,5$. Hodnota AM (Air Mass) rovna 1,5 odpovídá průchodu světla 1,5násobkem zemské atmosféry. Závislost výkonu na spektrálním rozložení světla, závisí také na použité technologii solárních článků.

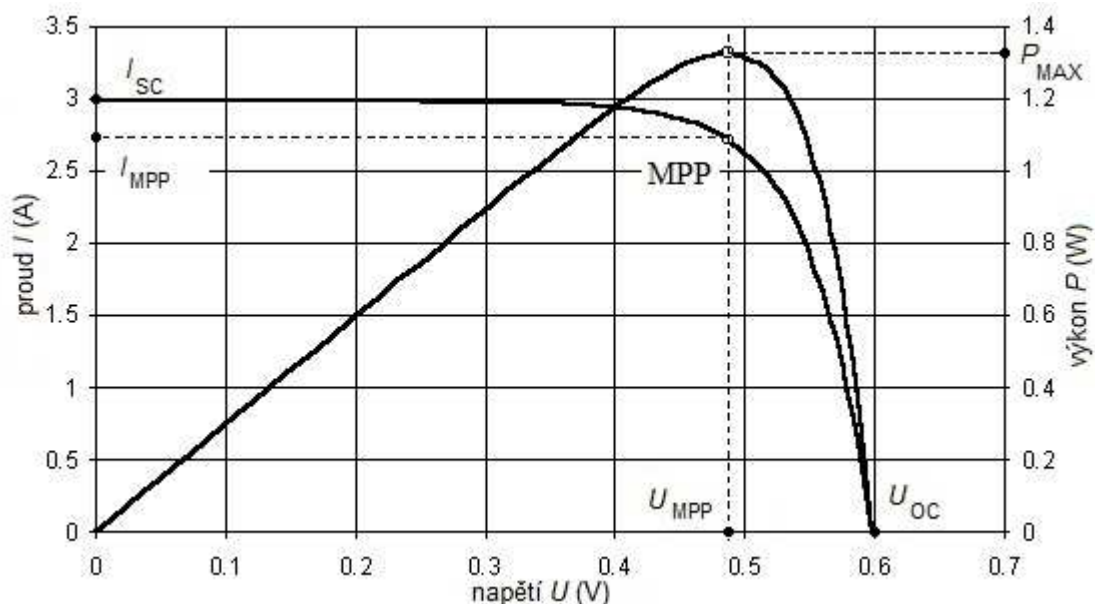
Výkon solárních článků se udává podle hodnoty maximálního výkonu. Tedy z bodu MPP, který je změřen při zkoušce, a proto se výkon udává ve Wp, Watt-peak je tedy hodnoty špičkového výkonu, která je dosažitelná při špičkových hodnotách slunečního záření. Ve Wp se tedy udávají výkony všech fotovoltaických zařízení.

Z hodnot zkratového proudu a napětí naprázdno lze orientačně určit i hodnoty napětí (1.37) a proudu (1.38) při maximálním výkonu:

$$U_{MPP} = (0,75 \div 0,9) \cdot U_{OC} \quad [10] \quad (1.37)$$

$$I_{MPP} = (0,85 \div 0,95) \cdot I_{SC} \quad [10] \quad (1.38)$$

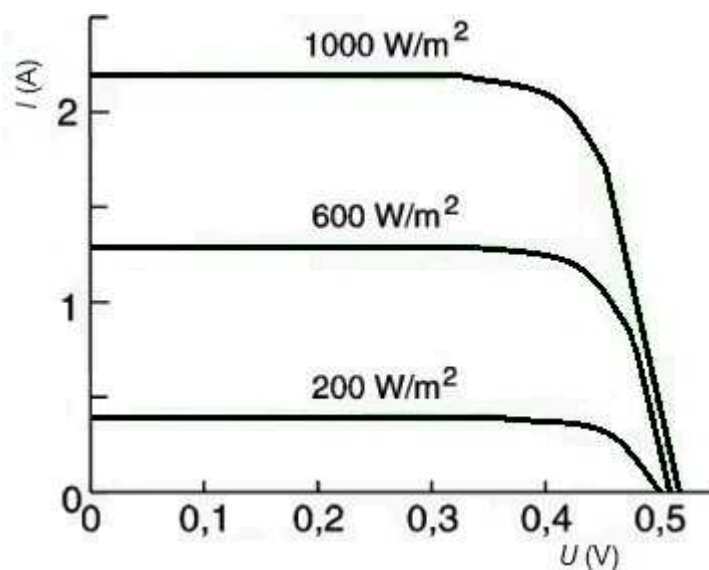
z těchto hodnot lze pak určit i bod maximálního výkonu MPP.



Obr.1.24 – VA charakteristika solárního článku [22]

Parametry solárních článků jsou velmi závislé na dopadající intenzitě slunečního záření. Pokud je intenzita nižší, je i výkon článku nižší (Obr.1.25). Výkon je také závislý na teplotě

fotovoltaického článku, u monokrystalického článku je pokles výkonu asi 0,5 % na 1 °C, u amorfního křemíku to je asi 0,25 % na 1 °C.



Obr.1.25 - Závislost charakteristiky solárního článku na intenzitě [23]

Typy solárních článků

Technologický vývojem bylo vyvinuto několik typů solárních článků. Aby se rozšířil určitý typ článku, musí být tento článek splňovat dvě kritéria. Jedno kritérium je samozřejmě účinnost přeměny solární energie na elektrickou, druhým kritériem je pak cena na 1 W. Můžeme sice vytvořit články s velkou účinností ale jejich pořizovací cena by byla neúnosná, proto je nutné vhodně zvážit tyto dvě kritéria. Základem každého článku je křemík, prvek, který má dobré vlastnosti a také je dobře dostupný, jelikož jeho zastoupení na Zemi je asi 30 %. Problémem křemíku však je nutné získat čistý křemík z SiO_2 . V tomto oxidu se křemík na zemi nachází, tento proces je velmi energeticky náročný, a proto se dále vyvíjejí další technologie. Z tohoto hlediska tak můžeme rozlišovat několik typů solárních článků:

- Klasické solární články
- Tenkovrstvé články
- MIS s inverzní vrstvou

○ Klasické solární články

Klasické solární články jsou na bázi krystalu křemíku, podíl výroby mezi fotovoltaickými panely je kolem 85 %.

Monokrystalický solární článek

Tyto články jsou vyrobeny z monokrystalického křemíku, ten je složen z jediného krystalu s pravidelnou mřížkou. Vyrábí se především Czochralského metodou tažení monokrystalu z taveniny, tímto procesem je získán ingot, který je ořezán do hranolu a následně za pomoci speciální drátové pily je získána destička, zde nastávají největší ztráty materiálu. V současné době je to nejrozšířenější typ s běžnou účinností 14 -17 %, laboratorně až 24 %.

Polykrystalické solární články

Články jsou vyráběny z polykrystalického křemíku, Siemensovou metodou, polykrystal je mnoho různě orientovaných krystalů, je to vlastně paralelní spojení monokrystalických článků.

Výsledkem je mnohem nižší cena, ale to je vykoupeno nižší účinností 10 až 14 %, navíc účinnost klesá s dobou používání.

Galium Arsenid (GaAs)

Jedná se o polovodičový slitinový materiál typu $A_{III}B_V$, články se vykazují vysokou účinností, ale také velmi vysokou cenou. Jsou především využívány v kosmických aplikacích a v koncentrátorových modulech. Účinnost se pohybuje kolem 25 % a při složitější struktuře až 30 %. Článek patří mezi klasické solární články, i když v jeho základu není křemík.

○ Tenkovrstvé články

Tenkovrstvé články se označují jako články 2. generace, mají tloušťku kolem 2 až 3 μm , oproti klasickým článkům, kde je tloušťka kolem 200 μm , hlavní výhodou je tedy úspora materiálu. Parametry takovýchto článků jsou ale nestabilní, pokud se podaří tuto nevýhodu odstranit, počítá se s velkým rozšířením těchto článků.

Amorfní solární článek

Články jsou vyrobeny z amorfního křemíku, kde jsou atomy nahodile uspořádány, toho se docílí tak, že se na skleněný substrát napaří křemík. Tato forma se ve fotovoltaice začala používat v roce 1974, dnes se hlavně používají jako zdroje malého výkonu, například pro kalkulačky. Nevyrábí se jako jeden článek, ale jako celé hotové moduly. Účinnost je malá a nestabilní v rozmezí 2 až 7 %, v laboratořích lze dosáhnout účinnosti až 10 %

Kadmium Telurid (CdTe)

Jedná se o článek s tenkovrstvým filmem polykrystalického materiálu, místo křemíku však používá CdTe. Film je nanášen elektrodepozicí, sprejováním a vysokorychlostním napařováním, to má za následek snížení výrobní ceny. Účinnost se běžně pohybuje kolem 8,4 %, laboratorně až 16 %.

Copper Indium Diselenide (CuInSe₂)

Podobně jako články s filmem CdTe, akorát je použit jiný materiál, laboratorní účinnost se pohybuje kolem 17,7 %.

Existují další tenkovrstvé technologie, vždy je použit jiný polykrystal, který se spojí se slabou vrstvou nosného materiálu. Mezi takovéto polykrystaly dále patří: Amorfní SiGe, InGaN, CIGS a mikrokrystaly křemíku.

○ MIS s inverzní vrstvou

Jedná se o články, které používají monokrystalický nebo polykrystalický křemík, zkratka MIS znamená Metal-Insulator-Semiconductor, v překladu kov-izolátor-polovodič, ve struktuře není nutné připravit PN přechod dotací, opačná vrstva, která je zde nazývána inverzní je tvořena speciálním materiálem, který musí splňovat důležité vlastnosti. Pokud máme tedy monokrystalický MIS článek jeho horní vrstva má účinnost kolem 15 %. MIS článek je ale citlivý i zespodu s účinností 13,8 %. Výhodné je tedy článek osvětlit z obou stran. Osvětlit jej lze například pomocí bílé stěny, na kterou je článek umístěn. Výsledná účinnost se pohybuje kolem 22 %.

O nových technologiích se mluví jako o 3. generaci solárních článků, jedná se o články s polymerovými vrstvami nebo fotocitlivým barvivem, kde se jako dobrý základ jeví TiO_2 , tandemové články, které se skládají z mnoha vrstev různých materiálů. Hlavním cílem nových technologií je získání velké účinnosti, teoreticky se předpokládají účinnosti kolem 45 % a přitom výrobní cena bude mnohem nižší.[3][6][10]

1.2.6. Solární panely

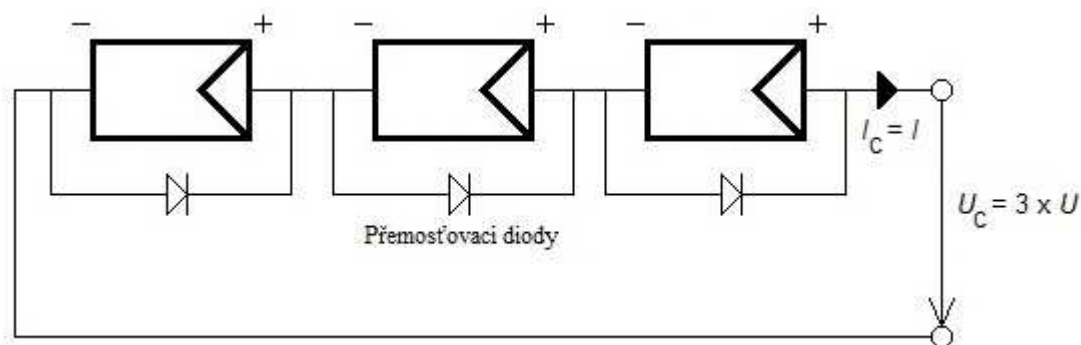
Základní solární článek má velmi malý výkon, navíc není nijak chráněn proti okolním vlivům, které by mohly článek poškodit. Z těchto důvodů se články komerčně nenabízejí, naopak se prodávají celé solární moduly, tzv. solární panely, které chrání články, umožňují jednodušší montáž a také zvyšují výkon. Pro zvýšení výkonu se solární články zapojují sériově, paralelně a sérioparalelně.

Sériové zapojení

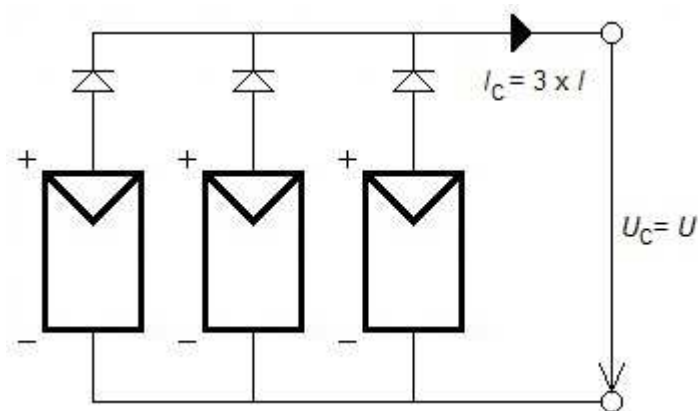
Sériové zapojení se používá pro zvýšení výstupního napětí solárního modulu. Do série se řadí články stejného typu. Napětí na výstupu je součet všech v sérii zapojených solárních článků a výstupní proud je stejný jako u jednoho článku. Při tomto zapojení může dojít k nežádoucímu efektu, kdy je některý článek zastíněn, článek je tak najednou napájen obráceně a zahřívá se, může dokonce dojít i ke zničení článku. Navíc dojde k drastickému snížení výkonu celého modulu. Proto je k solárnímu článku připojena antiparalelně dioda, která přemostí článek a proud teče přes diodu. Schéma je znázorněno na obrázku (Obr.1.26), prakticky se takto přemostňuje 15 až 20 solárních článků.

Paralelní zapojení

Paralelní zapojení (Obr.1.27) se naopak používá pro zvýšení výstupního proudu. Zapojují se články stejného napětí, výsledný proud je dán sumou proudů jednotlivých článků. I zde se používají diody pro ochranu solárních článků, diody v paralelním zapojení především zabezpečují dodávku proudu při výpadku jednoho a více článků. Je vhodné použít Schottkyho diody, které mají malý úbytek napětí. Většinou se paralelní zapojení používá společně se sériovým zapojením článků, které nám zvedne výstupní napětí, ale výstupní proud je velmi malý.

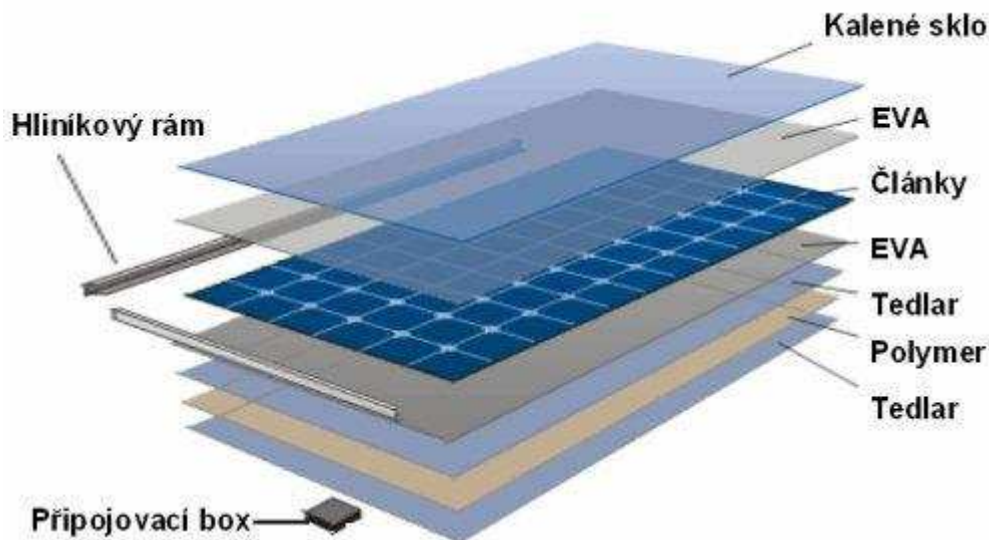


Obr.1.26 – Sériové zapojení článků



Obr.1.27 – Paralelní zapojení článků

Druhou hlavní funkcí solárních panelů je ochrana solárních článků. Konstrukčně jsou panely řešeny tak, aby se nejen zvětšil výkon solárního článku, ale také ochránil článek proti vlivům špatného počasí, jako je krupobití a také je nutné chránit vnitřní kontakty, solární články jsou tak hermeticky uzavřeny (Obr.1.28).



Obr.1.28 – Složení fotovoltaického panelu [6]

Přední krycí materiál musí splňovat několik požadavků, musí vydržet i devastujícím účinkům, které mohou vzniknout při krupobití. Naopak tento materiál musí umožnit co největší průchod slunečního záření, aby byla docílena co největší účinnost. Velmi vhodným materiálem je kalené sklo se sníženým obsahem železa.

Solární články jsou v panelu pospojovány podle potřeby a dnes se většinou ukládají do etylenvinylacetátové fólie, pro kterou se používá zkratka EVA. Tato fólie má dobré vlastnosti, jako dobrou propustnost světla a také dovoluje teplotní rozpínání solárních článků. Spodní část modulu je tvořena ještě ochranou vrstvou, která se skládá z několika vrstev. Fotovoltaické panely jsou navíc opatřeny úchytným systémem. Většinou se jedná o hliníkový rám, popřípadě různé profily z lehkých slitin. Dobrá konstrukce fotovoltaických panelů umožňuje životnost panelů 20 až 30 let.

Fotovoltaické panely jsou pak již namontovány na místo, kde bude stát fotovoltaická elektrárna. Panely je možno umístit dvěma způsoby, nejčastěji se používá pevné umístění, v tomto případě se solární panely namontují na pevný stojan, je nutné takovéto panely správně nasměrovat. Druhou možností je umístit panely na natáčecí zařízení, které sleduje pohyb Slunce po obloze. Zařízení se tak snaží co nejvíce využít solárního záření. Natáčecí zařízení má tedy hlavní výhodu většího využití přímého slunečního záření. Na druhé straně je tu i řada nevýhod: vyšší cena, další části solárního systému, tedy větší možnost poruchy. Navíc se ve většině případů jedná o mechanické části, které jsou na poruchu náchylnější. Existuje několik druhů natáčecích zařízení, většinou se však používají u menších výkonů.

Orientace solárních panelů je velmi důležitá. Při špatném nasměrování panelů dochází k špatnému osvětlení a tím snížení dodávaného výkonu. V zástavbě je panely nutno umístit do určité výšky, aby nedocházelo ke stínění panelů okolními budovami. Ve střední Evropě platí přibližné hodnoty, kdy orientace není přímo na jih, ale s určitým odklonem kolem 15°, sklon panelů se pohybuje od 30° do 45°, tento sklon je pro celoroční použití. V případě že máme možnost sklon panelů přestavovat na zimní období je vhodné tyto panely přestavit na sklon od 45° do 60°. [6][10]

1.2.7. Měniče

Jediným úkolem měniče je přeměna stejnosměrného proudu na střídavý sinusový proud. Existují 1-fázové a 3-fázové měniče. Dříve se používaly tyristorové měniče, bohužel kvalita napětí a proudu byla velmi špatná. Proto se začaly používat unipolární tranzistory, jako IGBT nebo MOSFETy. Dříve se také jednalo o univerzální měniče. Dnes se používají měniče, které jsou přímo navrženy pro fotovoltaické systémy.

U měničů je velmi důležitá účinnost, u starších měničů se pohybuje účinnost kolem 90 %, ale účinnost měniče klesá s výkonem, nejvyšší účinnosti se dosahovalo přibližně u 40 % jmenovitého výkonu měniče. Novější měniče mají účinnosti kolem 95 % a od 10 % jmenovitého výkonu měniče je tato účinnost téměř konstantní.

Moderní měniče mají velkou a konstantní účinnost kolem 95 %, kvalita výstupního napětí a proud je velmi dobrá, splňuje požadavky na vyšší harmonické a EMC. Montované měniče lze krátkodobě přetěžovat až o 30 % v síťovém provozu, u ostrovních provozů až o 200 %. Většina měničů má navíc možnost propojení s počítačem nebo vlastní datalogger, možnost monitorování celého systému. Dále se jedná o samostatný dohled nad sítí.

Nejnovější měniče jsou tzv. HERIC (Highly Efficient & Reliable Inverter Concept), které dosahují velkých účinností, nejlepší měniče dosahují až 98 % a mají vynikající spolehlivost.[10]

1.3. Problematika provozu obnovitelnými zdroji elektrické energie

Při provozu sítí s větším počtem obnovitelných zdrojů elektrické energie nastávají určité problémy. Nejvíce rozšířené obnovitelné zdroje jsou větrné, fotovoltaické a sluneční elektrárny, poslední dobou se zvyšuje i počet elektráren spalující biomasu. Vodní a elektrárny na biomasu mají také svoje problémy, ale jedná se o zdroje, které lze regulovat, proto nemají negativní vlivy na elektrizační soustavu.

Základním problémem větrných a fotovoltaických elektráren je proměnlivost výstupního výkonu, který není možné řídit, protože výkon je závislý na rychlosti větru respektive na intenzitě slunečního záření u fotovoltaických elektráren. Proto je nutné tyto zdroje zálohovat klasickými tepelnými elektrárnami. U větrných elektráren se řeší problémy hlučnosti, vysoké pořizovací náklady, dynamickým vývojem prochází především generátory větrných elektráren. Investiční náklady se řeší i u fotovoltaických elektráren, dále se řeší otázka nových technologií solárních článků, měničů a také recyklace použitých panelů. Problematice těchto zdrojů se věnuje spousta výzkumných aktivit nejen v České republice, ale i ve světě.

Na katedře elektroenergetiky VŠB-TU Ostrava probíhá dlouhodobý výzkumný záměr, Výzkum spolehlivosti energetických soustav v souvislosti s ekologií netradičních zdrojů a oceněním nedodané energie (MSM 6198910007), kde se řeší celá problematika komplexně, od vyhodnocení provozu obnovitelných zdrojů přes diagnostiku zařízení až po stanovení spolehlivosti jednotlivých zařízení v provozu a tvorbu databáze poruch. Konkrétně se například řeší problematika elektrické vzdálenosti větrných elektráren od bodu soustavy s vyšší hladinou napětí, vyhodnocován je pokles napětí se vzdáleností od přípojnice. Cílem je snížit riziko možného black-outu v České republice. Aktuálně se také zkoumají možnosti akumulace elektrické energie do vodíku.

Významně se dnes prosazuje predikce výroby s obnovitelných zdrojů, využívá se jak krátkodobá predikce s předpovědí výroby i na 10 minut dopředu, tak i dlouhodobé predikce na jeden den. Obnovitelné zdroje mají také vliv na parametry sítí, sleduje se především stabilita frekvence a stabilita napětí v jednom bodě elektrizační soustavy, pokud by se jednalo o síť bez obnovitelných zdrojů změny frekvence jsou velmi malé, téměř beze změny. Naopak v sítích, kde je napojeno více obnovitelných zdrojů, jsou změny frekvence výrazné, obdobně toto platí i napětí.

Další možností řešení problémů, je modernizace elektrizačních sítí, u distribučních sítí se setkáváme s pojmem Smart Grids, tyto sítě by měly mít inteligentní provoz. Spotřebiče by byly zapojovány podle potřeb sítě a uživatelského nastavení, spotřebitel by měl možnost změny tarifů atd. U přenosových sítí je jedná o tzv. FACTS – Flexible AC Transmission System, česky flexibilní střídavá přenosová síť. Síť ve které by se daly řídit toky činného výkonu, regulovat jalovou energii,

skladovat elektrickou energii, aby přenos i využití elektrické energie bylo co nejefektivnější. To by mělo být zajištěno polovodičovými součástkami, které budou ovládány pomocí řídicího systému. Vyvíjeny jsou i hybridní technologie, kdy by se větrné a fotovoltaické elektrárny zapojily do hybridního systému s akumulací elektrické energie, celý systém by byl rozdělen na několik subsystémů a vzájemně řízen a kontrolován. Tento systém, jako celek, by byl následně připojen do sítě, dodávaná elektrická energie by byla regulována a jednalo by se o řízenou výrobu.

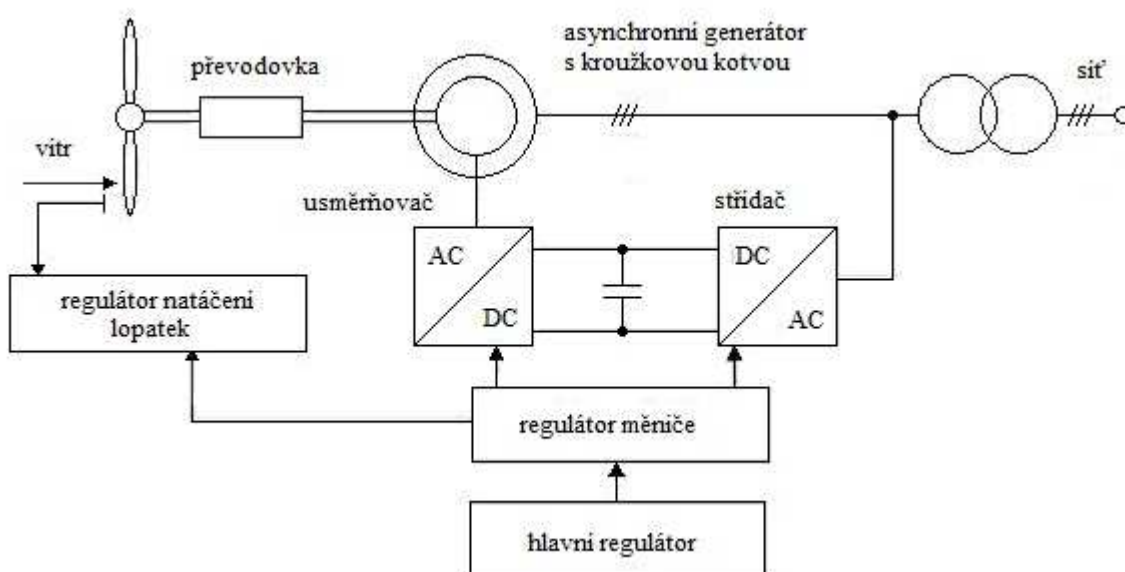
Dnes všechny výzkumy využívají možnosti simulování a modelování různých situací, rozsah výzkumu záleží na konkrétním státě, podle toho jaké jsou možnosti využití obnovitelných zdrojů na jeho území.[26][27][28][29][30]

2. Popis větrné elektrárny Veselí u Oder

2.1. Větrná elektrárna Veselí u Oder

Větrná elektrárna Veselí u Oder (Obr.2.2) se nachází v okrese Nový Jičín mezi obcemi Veselí a Dobešov v Oderských vrších. Pata věže se nachází v nadmořské výšce 544 m n.m. Elektrárna se skládá se ze dvou větrných elektráren Vestas V90 o výkonu 2 x 2MW a byla uvedena do provozu v listopadu roku 2006. Elektrický výkon je vyveden do distribuční sítě 22 kV ČEZ Distribuce.[3]

Větrná elektrárna Veselí u Oder má asynchronní generátor s kroužkovou kotvou. Generátor využívá frekvenční měnič s rekuperační jednotkou, využitím řídicího systému s frekvenčním měničem se lépe využije energie větru a zajistí se tak stabilnější dodávka výkonu do distribuční soustavy, kde je elektrárna připojena. Blokové schéma tohoto systému je na obrázku (Obr.2.1), systém frekvenčního měniče a asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou pracuje v kaskádním zapojení. [5]



Obr.2.1 – Blokové schéma elektrárny[5]



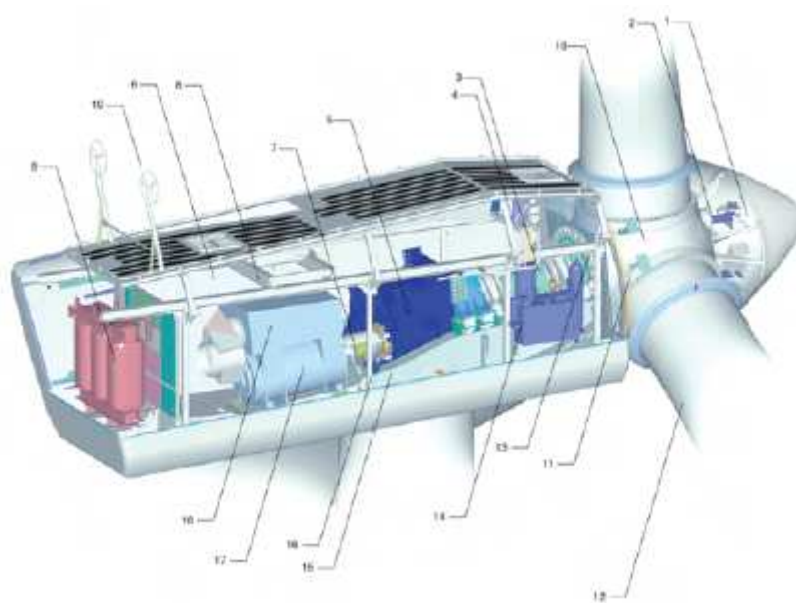
Obr.2.2 – Větrná farma Veselí u Oder[5]

Pracuje-li systém v kaskádním zapojení, je stator asynchronního generátoru přes transformátor NN/VN zapojen přímo do distribuční soustavy a rotor je napájen z frekvenčního měniče. Rotorové

vinutí je napájeno přes kroužky z rekuperačního měniče frekvence, pro vyhlazení průběhů napětí a proudu je v elektrárně umístěna tlumivka a sinusový filtr, ty jsou zapojeny mezi speciální rotorové vinutí a frekvenční měnič. [5]

Pomocí systému řízení se vyhodnotí rychlost větru a otáčky vrtule a pomocí multiprocesorového řízení se nastaví momentová charakteristika generátoru. Pro maximální využití energie toku větru se tímto způsobem řídí napětí a proud na rotoru stroje. Výkon, který je tedy řízen pomocí frekvenčního měniče je vzhledem k celkovému výkonu malý, a proto dochází k minimálním negativním vlivům na distribuční síť. Řídicí systém taky zabezpečuje minimální proudové rázy při připojování větrné elektrárny do distribuční sítě. [5]

2.2. Vestas V90



Obr.2.3. – Vestas V90[3]

Popis obrázku Obr.2.3

1 – řízení listů rotoru	2 – pitch válec	3 – hlavní hřídel
4 – chlazení oleje	5 – převodovka	6 – VMT Top řízení
7 – disková brzda	8 – servisní jeřáb	9 – transformátor
10 – rotorová hlava	11 – ložisko listu rotoru	12 – list rotoru
13 – aretace	14 – hydraulická jednotka	15 – základní rám
16 – otáčivý věnec	17 – OptiSpeed generátor	18 – chlazení generátoru
19 – anemometr		

Větrná elektrárna typ Vestas V90 – 2,0 MW je větrná elektrárna s nejmodernější technologií a svým výkonem se řadí do nejvyšší kategorie, základní parametry jsou uvedeny v tabulce (Tab.2.1) Jedná se o třílistou větrnou elektrárnu, kde je mezi větrným motorem a generátorem elektrické energie umístěna převodovka. Celé zařízení elektrárny je umístěno v gondole (Obr.2.3), rotor je vybaven zařízením OptiSpeed, které umožňuje pracovat rotoru s variabilními otáčkami. Větrná elektrárna má „pitch“ regulaci, tzn. má regulaci pomocí naklápění listů rotoru, to je řízeno pomocí zařízení OptiTip, což je speciální regulační systém dánské společnosti Vestas, který zaručuje vždy optimální nastavení listů vrtule, podle větrných poměrů.

Generátor je speciální, čtyřpólový asynchronní s vinutým rotorem. Systémy OptiTip a OptiSpeed zajišťují aby při nižších a vyšších rychlostech větru pohyboval okolo jmenovitého výkonu, nezávisle na rychlosti větru. Natáčení listů vrtule, se děje pomocí hydraulického systému, tento systém

umožňuje natáčet axiálně listy až o úhel 95° , natáčení gondoly je prováděno čtyřmi elektricky poháněnými převodovkami. Gondola je umístěna na 80-metrových kónických věžích.

Pomocí nastavení listů větrného rotoru do praporu je zajišťováno brzdění, parkovací brzda je umístěna na vysokorychlostní hřídeli převodu. Celé zařízení elektrárny je řízeno a kontrolováno pomocí řídicích jednotek na bázi mikroprocesorů.[3]

Tab.2.1 - Parametry Vestas V90 – 2,0 MW

Jmenovitý výkon	2 MW
Jmenovitá rychlost větru	$14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Zapojovací rychlost větru	$4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Odpojovací rychlost větru	$23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Průměr rotoru	90 m
Plocha rotoru	6362 m^2
Počet listů rotoru	3
Počet otáček rotoru	$8,2 - 17,3 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Hmotnost rotoru	36,3 t
Hmotnost gondoly	68 t
Generátor	asynchronní, zdvojené napájení
Počet otáček generátoru	$1680 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Napětí	690 V
Regulace výkonu	pitch
Regulace otáček	aktivní naklápění listů vrtule
Hlavní brzdový systém	nastavení listů do praporu
Vedlejší brzdový systém	kotoučové brzdy
Natáčení gondoly	4 elektromotory
Výška a hmotnost kónických ocelových věží	80 m - 147 t
	95 m - 200 t
	105 m - 224 t

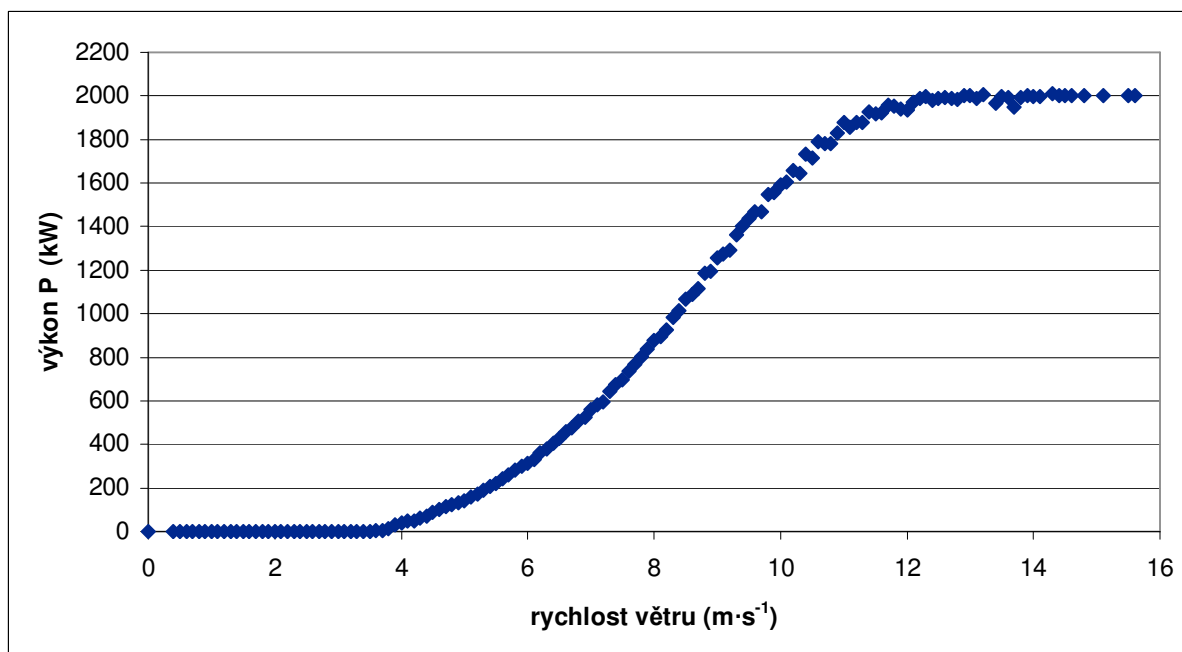
2.3. Charakteristiky větrné elektrárny

2.3.1. Výkonová charakteristika

Výkonová charakteristika (Obr.2.4) zobrazuje jaký výkon dodává větrná elektrárna při určité hodnotě rychlosti větru, výkonová charakteristika byla vykreslena pro změřená data od 20.3.2007 do 10.5.2007, bližší informace o použitých datech jsou uvedeny v 5. kapitole diplomové práce. Zde uvedená charakteristika je pro větrnou elektrárnu Veselí 1, jelikož elektrárna Veselí 2 je stejného typu, platí tato charakteristika i pro druhou elektrárnu, tato skutečnost byla ověřena.

Z charakteristiky si lze ověřit i hodnoty uváděné výrobcem, jedná o zapojovací rychlost a jmenovitou rychlost. Zapojovací rychlost je taková rychlost, při které elektrárna začíná dodávat elektrickou energii do sítě, výrobce udává hodnotu $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z naměřených dat tak i z grafu je patrné, že elektrárna začíná dodávat při rychlosti přibližně $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výrobce udává jmenovitou hodnotu $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, jmenovitá hodnota rychlosti větru je hodnota při které se větrná elektrárna dostane na svůj jmenovitý výkon, ve skutečnosti se dostáváme na hodnotu jmenovitého výkonu už při rychlostech vyšších než $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Odpojovací rychlost není možno z naměřených dat určit, v daném období nebyla na větrné elektrárně Veselí 1 zjištěna vyšší rychlost než $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, u Veselí 2 byly sice zaznamenány o něco vyšší hodnoty v daném časovém období, ale rychlost nepřesáhla hodnotu $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

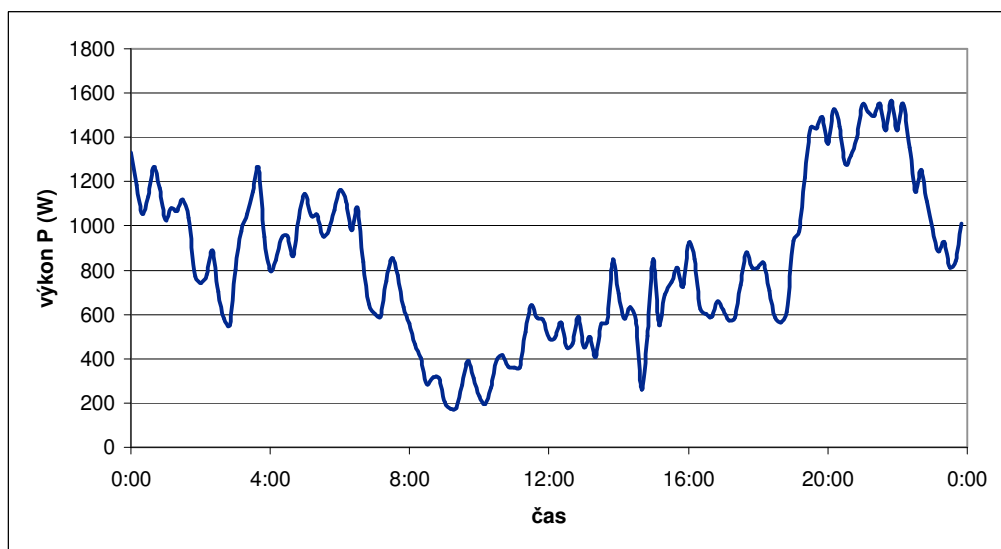
Od jmenovité hodnoty výkonu je také možno v grafu vidět funkci regulace výkonu a otáček, od hodnoty rychlosti větru $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ lze výstupní výkon považovat za konstantní, pohybující se na hodnotě 2 000 kW. Při hodnotách rychlosti větru pod $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ elektrárna do sítě nedodává elektrickou energii, naopak elektrárna odebírá malý výkon, řádově se jedná o jednotky kW.



Obr.2.4 – Výkonová charakteristika větrné elektrárny Veselí 1

2.3.2. Tok výkonu

Další možností hodnocení provozu, lze provést jednoduše podle toku činného výkonu z elektrárny, v grafu (Obr.2.5) je vykreslen tok výkonu pro jeden den z naměřených dat. Konkrétně se jedná o 14.4.2007. v charakteristice lze vynést více dnů a vzájemně porovnávat, ale při větším počtu dnů jsou průběhy nepřehledné.



Obr.2.5 – Tok výkonu z větrné elektrárny během jednoho dne

2.3.3. Součinitel využití

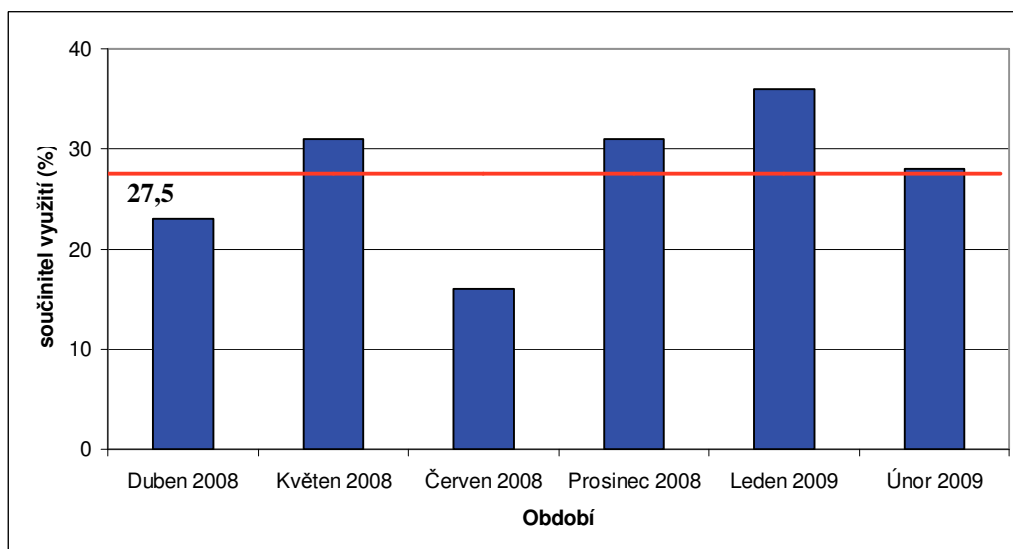
Důležitým ukazatelem každé výroby elektrické energie je součinitel využití, součinitel ukazuje kolik elektrické energie bylo vyrobeno z maximální možné vyrobené elektrické energie za určité období.

Teoretická hodnota součinitele využití větrných elektráren se pohybuje kolem 30 %. Pro ukázkou součinitele využití byla použita již vyhodnocená data z větrné elektrárny Veselí 1, data jsou uvedena v tabulce (Tab.2.2)[5]. U vyhodnocení je součinitele využití je důležité mít dobře změřené data, tak abychom měli 100 % hodnot, čím menší část dat máme tím méně přesná data získáme, v tabulce ve třetím sloupci jsou uvedeny relativní hodnota počtu naměřených dat.

Tab.2.2 – Součinitele využití

období	součinitel využití (%)	změřených hodnot (%)
Duben 2008	23	96,66
Květen 2008	31	83,73
Červen 2008	16	94,72
Červenec 2008	21	53,22
Srpen 2008	19	29,83
Listopad 2008	49	35,00
Prosinec 2008	31	100,00
Leden 2009	36	100,00
Únor 2009	28	100,00
Březen 2009	28	49,59

Pro celkové vyhodnocení byly vybrány měsíce (Obr.2.6), kde se podíl změřených dat pohyboval nad 80 %. Průměrný součinitel využití pak vyjde 27,5 %, tuto hodnotu lze brát za dobrou a hovoří o dobře zvolené lokalitě, která byla vybrána pro realizaci větrné elektrárny Veselí.



Obr.2.6 – Grafické porovnání součinitelů využití

3. Popis solární elektrárny na nové knihovně VŠB-TU Ostrava

3.1. Solární elektrárna na budově NK

Fotovoltaická elektrárna na budově nové knihovny VŠB-TUO (Obr.3.1) byla postavena v rámci projektu Slunce do škol, jedná se fotovoltaický systém o celkovém výkonu 20 kWp. Projekt vznikl za účelem rozšíření znalostí o fotovoltice a jako zdroj dat pro možnost vyhodnocování provozu fotovoltaického systému. Realizace projektu začala v roce 2000, kdy byla podána žádost o dotaci na výstavbu elektrárny Státnímu fondu životního prostředí, finanční podíl fondu byl 70 % a zbylé náklady hradila firma Solartec s.r.o., která je hradila ze zahraničního grantu. Celkové investiční náklady byly 8 502 000 Kč. Veškeré práce byly ukončeny 4.12.2002 a tento fotovoltaický systém se stal v té době největší fotovoltaickou elektrárnou v České republice.



Obr.3.1 – FVE na budově NK VŠB-TUO [24]

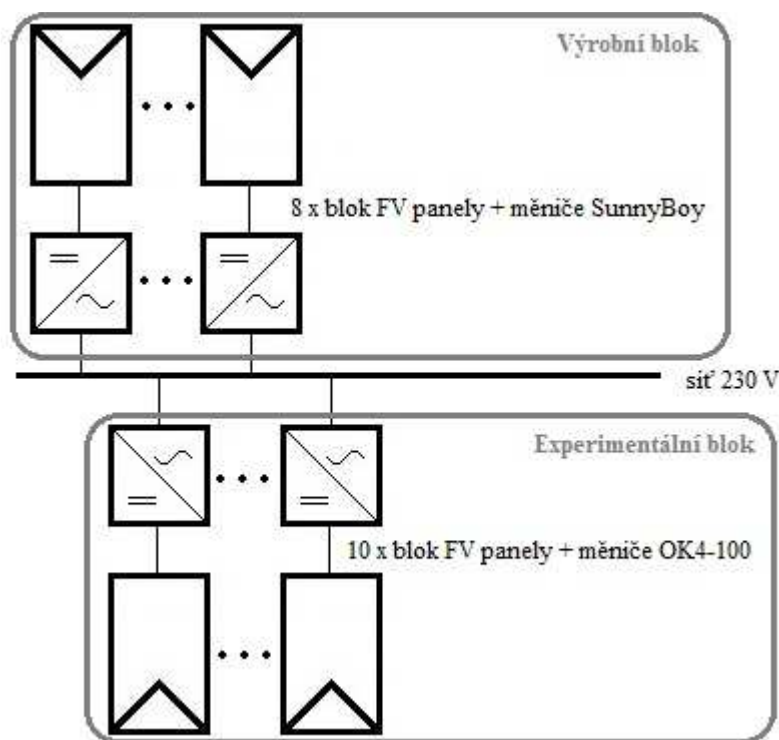
Fotovoltaická elektrárna je tvořena 192 ks fotovoltaických panelů, jedná se o panely obsahující články z monokrystalického křemíku. Celková plocha všech fotovoltaických panelů je 167,3 m² a panely jsou orientovány od jihu k západu pod úhlem 17°, sklon panelů je 45°. Celý systém je rozdělen na dva bloky (Obr.3.2), výrobní a experimentální blok. Výrobní blok má výkon 19 kWp, tvoří ho 8 samostatných skupin, každá skupina panelů je zapojena přes měnič Sunny Boy do sítě nízkého napětí VŠB-TUO. Experimentální blok má zbývajících výkon 1 kWp, dodává také do sítě nízkého napětí, tento blok je rozdělen do 10 skupin, každá má svůj měnič typu OK4-100. Skupiny lze v experimentálním bloku různě zapojovat pro výzkumné účely.

Pro potřeby vyhodnocování dat, se měří 2 intenzity slunečního záření, jedna přímo, druhá se měří pod sklonem 45°, dále se měří teploty několika panelů a teplota vzduchu. Pro každý z 18 bloků se měří proud, napětí a výkon, navíc je měřen i celkový dodávaný výkon. Mezi další měřené veličiny patří rychlost větru a jeho směr, kontrola výstupního napětí a frekvence. [13][14]

3.2. Panely Solartec SCO72

Elektrárna se skládá z panelů řady SCO72 od firmy Solartec o různých třídách výkonů, jedná se o 76 ks panelů typ SCO72-102, 86 ks panelů typ SCO72-106 a o 30 panelů SCO72-110, poslední číslo typu panelů udává jeho stejnosměrný výkon, celkový stejnosměrný výkon namontovaných panelů je 20 168 Wp. V tomto druhu panelů je použit monokrystalický solární článek SC2229-2255, který je vyvinut technologií firmy Solartec. Solární články dosahují účinnosti přeměny sluneční energie na elektrickou energii od 13,4 až 15,4 %, článek má čtvercový rozměr o straně délky

102,5 mm, tím je zajištěna dostatečně velká hustota výkonu z plochy panelu. Vybrané parametry panelů jsou uvedeny v tabulce (Tab.3.1), každý článek prochází kusovou zkouškou.



Obr.3.2 – Schéma FVE na NK

Tab.3.1-Parametry použitých solárních panelů

Typ panelu	Počet	P_N	P_{MAX}	U_{MPP}	I_{MPP}	U_{OC}	I_{SC}	η
	(ks)	(Wp)	(Wp)	(V)	(A)	(V)	(A)	(%)
SCO72-102	76	102	101,4	16,7	6,12	21,4	6,89	11,8
SCO72-106	86	106	105,8	17,1	6,19	21,5	6,95	12,3
SCO72-110	30	110	109,9	17,4	6,32	21,6	7,01	12,8

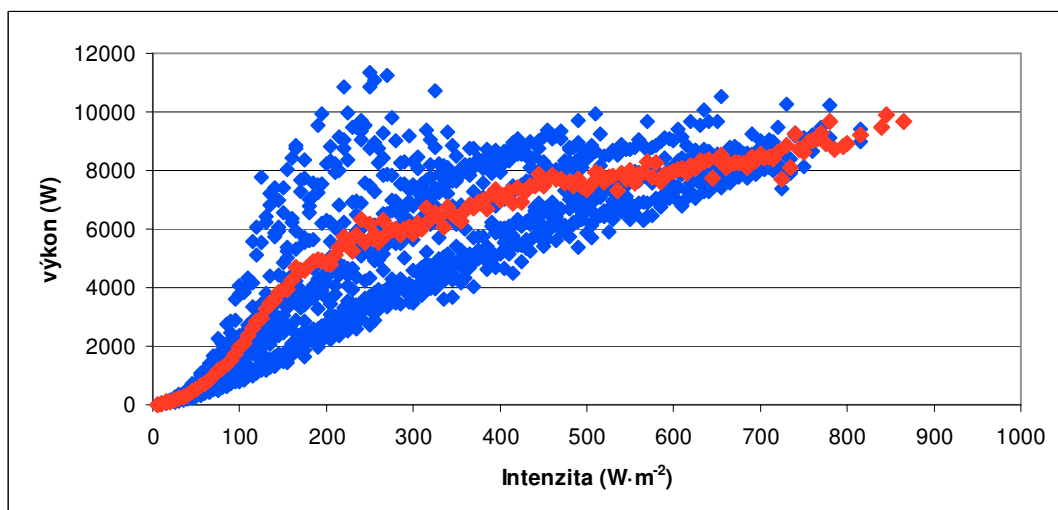
Fotovoltaické panely řady SCO72 jsou zapouzdřeny technologií EVA, jedná se o běžně používané zapouzdření, přední stranu panelů tvoří tvrzené sklo o síle 4 mm, zadní strana panelů je tvořena bílým tedlarem a vše je uloženo v rámu z eloxovaného hliníku. Rám nemá žádné otvory pro montáž, panely uchycují pomocí speciálních úchytů ve tvaru U. Rozměry každého panelu z řady SCO72 jsou stejné, délka 1 314 mm a šířka 660 mm, celková tloušťka jednoho panelu je 26 mm a hmotnost je 10 kg.

Provozní teplota je v rozmezí -35 °C až 85 °C, standardní záruka je 2 roky a garance výkonu je 90 % po 10 letech provozu a 80 % po 25 letech provozu. Každý panel má vlastní připojovací box pro napětí 12 V. [13][15]

3.3. Charakteristiky fotovoltaické elektrárny

3.3.1. Výkonová charakteristika

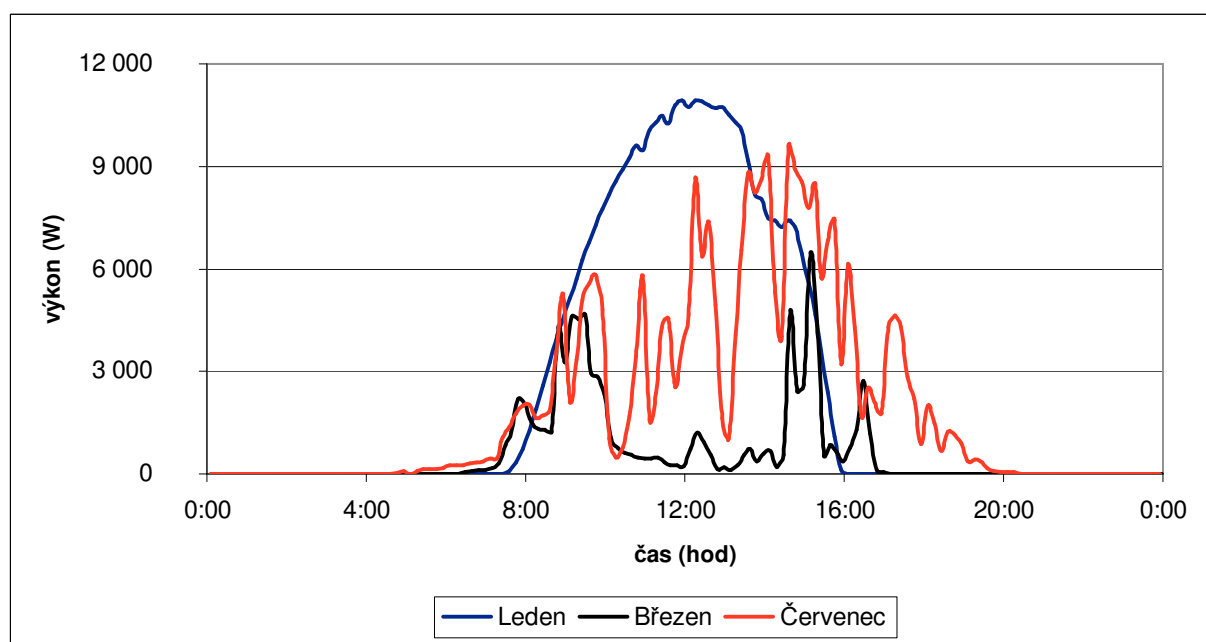
Výkon fotovoltaické elektrárny je závislý na okamžité intenzitě slunečního záření. Z naměřených dat, které jsou popsány v 5. kapitole, byla vykreslena výkonová charakteristika fotovoltaické elektrárny VŠB-TU Ostravy.



Obr.3.3 – Výkonová charakteristika fotovoltaické elektrárny

Z výkonové charakteristiky (Obr.3.3) je patrné, že výkon solární elektrárny je velmi proměnlivý. Červenou barvou je znázorněn průměrný výkon při určité intenzitě. Modrou barvou je znázorněn celkový rozptyl výkonů. Při porovnání výkonové charakteristiky větrné (Obr.2.4) a fotovoltaické elektrárny (Obr.3.3) lze vidět větší rozdíly při výrobě u FVE. Je to dáno tím, že výkon FVE je také závislý na teplotě, osvětlení jednotlivých panelů.

3.3.2. Tok výkonu



Obr.3.4 – Denní tok výkonů fotovoltaické elektrárny

Zatímco tok výkonu z větrné elektrárny, který je závislý na rychlosti větru, se nedá předpokládat. U fotovoltaických elektráren určité možnosti predikce výroby máme. Slunce vychází ráno, tím začne výkon panelů stoupat, kolem poledne jsou intenzity nejvyšší a výkon je také nejvyšší, když slunce začíná zapadat začne klesat i dodávaný výkon. Tento předpoklad, však nezahrnuje pohyb oblak, které zastiňují a rozptylují sluneční záření.

Pro graf toku výkonů (Obr.3.4) byly náhodně vybrány 3 dny, z dat Data 3. Jedná se o jeden den z ledna, března a července od 0:00 do 24:00. Z grafu je patrné, že lednový den byl velmi jasný, a proto dosahujeme téměř ideální křivky toku výkonu, dále je z naměřených hodnot i grafu vidět, že zimní den je kratší, z hlediska denního světla. První dodávka elektrické energie v lednu je kolem 7:30, naopak první dodávka elektrické energie v červenci je už kolem 4:45. Obdobně lze srovnat i poslední dodávku elektrické energie v lednu kolem 16:00, v červenci až po 20:00.

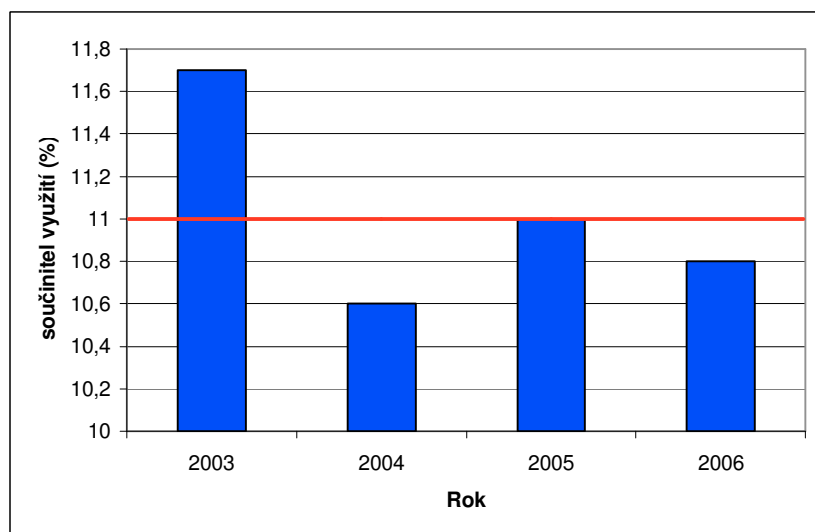
Pro letní měsíce platí, že se oblačnost přes den velmi mění, tím dochází k odclonění nebo k zaclonění slunečního záření, proto vznikají takové skoky v aktuálním dodávaném výkonu. V zimních měsících je nebe často velmi čisté, a proto se výkon příliš nemění a nevyskytují se výkyvy výkonu.

3.3.3. Součinitel využití

Hodnoty součinitele využití byly převzaty z hodnocení provozu fotovoltaické elektrárny[13] a hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab.3.2), teoretická hodnota součinitele využití pro fotovoltaické elektrárny se pohybuje kolem hodnoty 10 %. Z hodnota součinitelů pro každý rok byl vypočten průměrný součinitel využití 11 %. Pro lepší možnost porovnání jsou součinitelé využití vyneseny graficky (Obr.3.5).

Tab.3.2 – Součinitelé využití

rok	součinitel využití (%)
2003	11,7
2004	10,6
2005	11,0
2006	10,8



Obr.3.5 – Porovnání součinitelů využití fotovoltaické elektrárny.

4. Metodika kvantifikace stability dodávaného výkonu obnovitelných zdrojů

4.1. Četnost změny výkonu

Četnost změny výkonu ukazuje počet výskytů změn jednotlivých výkonů, vyráběných v obnovitelných zdrojích, ve sledovaném časovém období. Četnost změny výkonu může být číselná nebo procentuální. Tuto četnost lze získat z dlouhodobých měření činných výkonů. Dále jsou naměřené výkony, pomocí výpočetní techniky a tabulkového editoru, zpracovány na četnost změny výkonu. Dá se tak sledovat dynamika dodávané elektrické energie z větrných a slunečních elektráren.

4.1.1. Číselná četnost změny výkonu

Číselná četnost změny výkonu říká kolik změn určitého výkonu bylo ve sledovaném období. Například pokud máme měřené výkony po 10 minutách a vyšetřujeme změny výkonu do 100 W, od 100 W do 200 W a nad 200 W. Pokud je hodnota četnosti výkonové změny do 100 W 1000, znamená to že v daném období, ze kterého pocházejí naměřené výkony, bylo 1000 změn výkonu do 100 W během 10 minut.

4.1.2. Procentuální četnost změny výkonu

Procentuální četnost změn výkonu je téměř shodná s číselnou četností, akorát místo konkrétní hodnoty četnosti říká procentuální podíl výkonových změn ze všech změn v daném období. Například pokud máme opět měřené výkony po 10 minutách a vyšetřujeme výkonové změny do 100 W, od 100 W do 200 W a nad 200 W a hodnota procentuální četnosti změny výkonu pro výkonovou změnu do 100 W je 50 %, znamená to, že ve sledovaném období bylo 50 % změn výkonu do 100 W během 10 minut.

4.2. Stanovení četnosti změny výkonu

Pro stanovení četnosti změny výkonu z naměřených činných výkonů je použit tabulkový procesor MS Excel 2003. Pro tuto verzi programu je v následujících kapitolách popsán návod, jak stanovit četnost změny výkonu. Tuto metodu lze použít i u jiných tabulkových procesorů, pokud mají vhodné nástroje a funkce. Stanovení četnosti výchyly probíhá v několika bodech:

- Úprava naměřených dat
- Stanovení rozdílů
- Výpočet četností pomocí analytického nástroje Histogram
- Výpočet relativních četností

4.2.1. Úprava naměřených dat

Pro výpočet četnosti změny výkonu, pomocí Excelu, je nutné mít naměřená data ve formátu, který je Excel schopný zpracovat. Pokud tomu tak není je nutné tyto data převést na podporovaný formát, například pomocí importu externích dat (Data → Importovat externí data) nebo jiný způsobem.

Další důležitou věcí je správná časová posloupnost naměřených dat. Často se stává, že chybí jedna naměřená hodnota nebo delší časový úsek naměřených hodnot. Pro další zpracování je vhodné provést eliminaci časových chyb, která nám zabráni zanesení časové chyby ve výpočtu rozdílů. Eliminaci časové chyby (Obr.4.1) provedeme jednoduše pomocí vložení prázdného řádku mezi 2 po

sobě nenásledující údaje o výkonu. Jinak by se při výpočtu rozdílu výkonů odečítaly hodnoty, které nejdou časově po sobě.

4.2.2. Stanovení rozdílu výkonu

Existují dvě možnosti stanovení rozdílu výkonu:

- fyzikální rozdíl

Fyzikální rozdíl znamená, že výsledné četnosti jsou vztaženy na konkrétní rozpětí výkonových změn.

- relativní rozdíl

Relativní rozdíl znamená, že výsledné četnosti jsou vztaženy na procentuální rozpětí výkonových změn vzhledem k instalovanému výkonu.

Obě varianty jsou si velmi podobné, rozdílné jsou jen v použitých vzorcích pro výpočet. Pro ukázkový výpočet byly zvoleny hodnoty uvedené v tabulce (Obr.4.1), k těmto hodnotám se vztahují všechny výpočty uvedeny v kapitole 4.2.

	A	B
1	čas	výkon P (W)
2	1.1.2000 0:00	100
3	1.1.2000 0:10	150
4	1.1.2000 0:20	120
5		
6	1.1.2000 1:40	90
7	1.1.2000 1:50	110
8	1.1.2000 2:00	115

← Eliminace časové chyby
Pokud chybí 1 a více časových údajů, provede se vložení prázdného řádku

Obr.4.1 – Eliminace časové chyby

a) fyzikálně

Matematicky se jedná se o absolutní rozdíl současné hodnoty výkonu a předešlé hodnoty výkonu (vztah 4.1), v EXCELU se použije zápis funkce ABS (vztah 4.2):

$$\Delta P = |P_t - P_{t-1}|, \quad (4.1)$$

$$\Delta P = \text{ABS}(X2 - X1), \quad (4.2)$$

kde ΔP je rozdíl výkonu, P_t (X2) současná hodnota(souřadnice), P_{t-1} (X1) je předchozí hodnota(souřadnice), všechny hodnoty jsou ve Wattech. První výpočet se provede až pro druhý časový údaj, protože potřebujeme předešlou hodnotu výkonu, kterou však pro první údaj nemáme.

	A	B	C
1	čas	výkon P (W)	výkonová změna ΔP (W)
2	1.1.2000 0:00	100	
3	1.1.2000 0:10	150	50
4	1.1.2000 0:20	120	30
5			
6	1.1.2000 1:40	90	
7	1.1.2000 1:50	110	20
8	1.1.2000 2:00	115	5

← zde 1.výpočet změny
← při rozkladu funkce zastaví aplikaci na celý sloupec
← opětovně pokračování výpočtu

Obr.4.2 – Výpočet číselného rozdílu v Excelu

Pokud byla provedena správně eliminace časových chyb při rozkřiknutí (aplikace funkce na celý sloupec) zadané funkce v Excelu se výpočet provede do řádku před chybou. Ve sloupci teď budou 2 volné buňky pod sebou. Na 3 buňku aplikujeme vztah (3.1) respektive vztah (3.2) pro Excel. Vše je názorně zobrazeno na Obr.4.2.

b) relativně

Pro výpočty relativních rozdílů je nutné vědět jmenovitou hodnotu výkonu, pokud tuto hodnotu neznáme použijeme průměr maximálních hodnot výkonu ze sledovaného období. Ta se pak použije, jako jmenovitá hodnota výkonu.

Nejdříve vypočteme relativní hodnotu výkonu podle vztahu (4.3). Výpočet relativní hodnoty výkonu se provádí pro každou hodnotu měřeného výkonu (pro každý řádek v Excelu, s výjimkou prázdných řádků). Pak vypočteme absolutní rozdíl současné a předešlé hodnoty relativní hodnoty výkonu (4.4), zápis v Excelu je popsán vztahem (4.5). Pro výpočty absolutního relativního rozdílu platí stejné pravidla jako u výpočtu ve fyzikálních hodnotách. Jedinými rozdíly jsou relativní hodnoty v procentech a jeden sloupec navíc (Obr.4.3).

$$P_{\%} = \frac{P_t}{P_N} \cdot 100, \quad (4.3)$$

$$\Delta P_{\%} = |P_{\%t} - P_{\%t-1}|, \quad (4.4)$$

$$\Delta P_{\%} = \text{ABS}(X2 - X1), \quad (4.5)$$

kde $P_{\%}$ - relativní hodnota výkonu (%)
 P_t - hodnota výkonu (W)
 P_N - jmenovitá hodnota výkonu (W)
 $\Delta P_{\%}$ - absolutní relativní rozdíl výkonu (%)
 $P_{\%t}$ - relativní hodnota výkonu v čase t (%)
 $P_{\%t-1}$ - relativní hodnota výkonu v čase $t-1$ (%)
 $X2, X1$ - souřadnice buněk v Excelu.

	A	B	C	D
1	čas	výkon P (W)	výkon P (%)	výkonová změna ΔP (%)
2	1.1.2000 0:00	100	50,0	
3	1.1.2000 0:10	150	75,0	25
4	1.1.2000 0:20	120	60,0	15
5				
6	1.1.2000 1:40	90	45,0	45
7	1.1.2000 1:50	110	55,0	10
8	1.1.2000 2:00	115	57,5	2,5

Obr.4.3 – Tabulka pro výpočet relativní odchylky v Excelu

4.2.3. Výpočet četností pomocí analytického nástroje Histogram

Pro stanovení četností je nejlepší použít analytický nástroj Histogram, který je součástí Excelu. Je nutné ho zapnout, protože je realizován jako doplněk. Histogram je součástí balíku Analytické nástroje (Nástroje → Doplněk... → zaškrtnout Analytické nástroje a potvrdit). Po opětovném spuštění Excelu je v položce Nástroje nová položka Analýza dat..., která obsahuje nástroj Histogram.

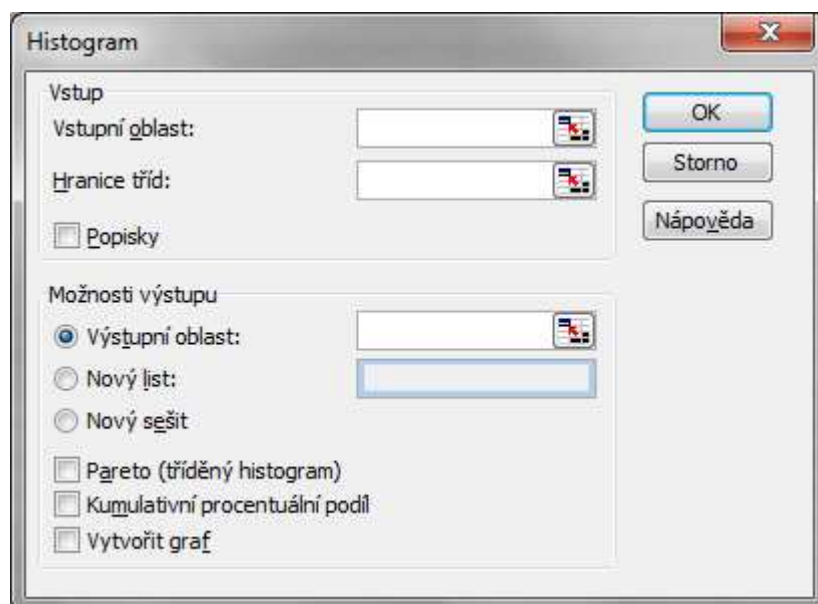
Pro výpočet četností potřebujeme ještě tabulku s rozpětím výkonů, které chceme sledovat. Ty se v Histogramu jmenují třídy. Podle těchto tříd provede Histogram výpočet četností. Například pro

tabulku tříd (Obr.4.4) kolik výkonových odchylek je do 10 %, kolik jich je mezi 10 až 30 % atd. Histogram navíc vypočte i kolik odchylek je vyšších než nejvyšší třída (pro tabulku na (Obr.4.4) vyšších než 50 %). Místo procentuálních tříd lze použít i výkonové třídy ve wattech.

	A
1	Výkonová změna (%)
2	10
3	30
4	50

Obr.4.4. - Třídy pro relativní hodnoty

Ted' již máme připraveny všechny potřebné vstupní údaje pro analytický nástroj Histogram. Po spuštění Histogramu (Nástroje → Analýza dat... → Histogram) se nám otevře okno, kde je nutné vyplnit položky Vstupní oblast a Hranice tříd (Obr.4.5). Pomocí ikony na výběr dat vybereme do vstupní oblasti výkonové odchylky a do hranic tříd vybereme tabulku hodnot s rozpětím výkonů. Další možnosti již nejsou povinné, slouží k nastavení umístění výsledné tabulky a dalších výpočtů (Pareto, kumulativní procentuální podíl a Vytvořit graf). Po kliknutí na OK dostaneme tabulku (Obr.4.6) s vypočítanými četnostmi.



Obr.4.5 – Vstupní okno analytického nástroje Histogram

	A	B
1	<i>Třídy</i>	<i>Četnost</i>
2	10	2
3	30	2
4	50	1
5	Další	0

Obr.4.6. – Vypočítané četnosti pomocí Histogramu

Z tabulky na obrázku (Obr.4.6) je vidět že odchylky výkonu do 10 % jsou 2 atd., do 30% taky 2 a jedna výkonová změna byla nad 50 % jmenovitého výkonu, tyto hodnoty platí pro data uvedená v tabulce na obrázku (Obr.4.3). Stejným způsobem se stanoví četnosti i z absolutních odchylek výkonu ve wattech, rozpětí výkonů je pak ve wattech.

4.2.4. Výpočet relativní četnosti změny výkonu

Analytický nástroj histogram nám stanovil číselnou četnost změn výkonu. Pro lepší znázornění a porovnání je lepší použít procentuální (relativní) hodnotu četností. Výpočet procentuální četnosti výkonové změny je jednoduchý. Stanoví se počet všech četností pomocí funkce SUMA vztah (4.6), v Excelu zapsán jako vztah (4.7),

$$\sum \text{četností} = \sum \check{C}_i, \quad (4.6)$$

$$\sum \text{četností} = \text{SUMA}(B2 : B5), \quad (4.7)$$

kde \check{C}_i je číselná hodnota četnosti v i -té třídě a $\sum \text{četností}$ je suma všech četností. Výpočet se umístí na další volný řádek pod výpočty z Histogramu (Obr.4.7), suma četností je zde v buňce B6. V dalším volném sloupci se provede výpočet procentuální hodnoty četnosti (4.8), zápis v Excelu (4.9) je pro tabulku na obrázku (Obr.4.7). Výpočet se provede pro první třídu a rozklikne se, aby byl výpočet správný je nutno sumu četností v Excelu označit pomocí dolaru jak je vidět ve vztahu (4.9) pro 2.řádek. Po rozkliknutí funkce máme stanoveny procentuální četnosti změny výkonu, správnost výpočtů lze ověřit sečtením všech procentuálních četností. Součet musí být roven 100 %.

$$\check{C}_{\%i} = \frac{\check{C}_i}{\sum \text{četností}} \cdot 100, \quad (4.8)$$

$$\check{C}_{\%2} = C2 / \$B\$6 * 100, \quad (4.9)$$

kde $\check{C}_{\%i}$ - procentuální hodnota četnosti (%)
 \check{C}_i - číselná hodnota četnosti v i -té třídě(%)
 $\sum \text{četností}$ - suma číselných četností
 $C2, \$B\6 - souřadnice buněk v Excelu.

	A	B	C
1	<i>Třídy</i>	<i>Četnost</i>	<i>Četnost (%)</i>
2	10	2	40
3	30	2	40
4	50	1	20
5	Další	0	0
6	$\sum \text{četností}$	5	

Obr.4.7 - Tabulka číselných a procentuálních četností

4.3. Vyhodnocení četnosti změny výkonu

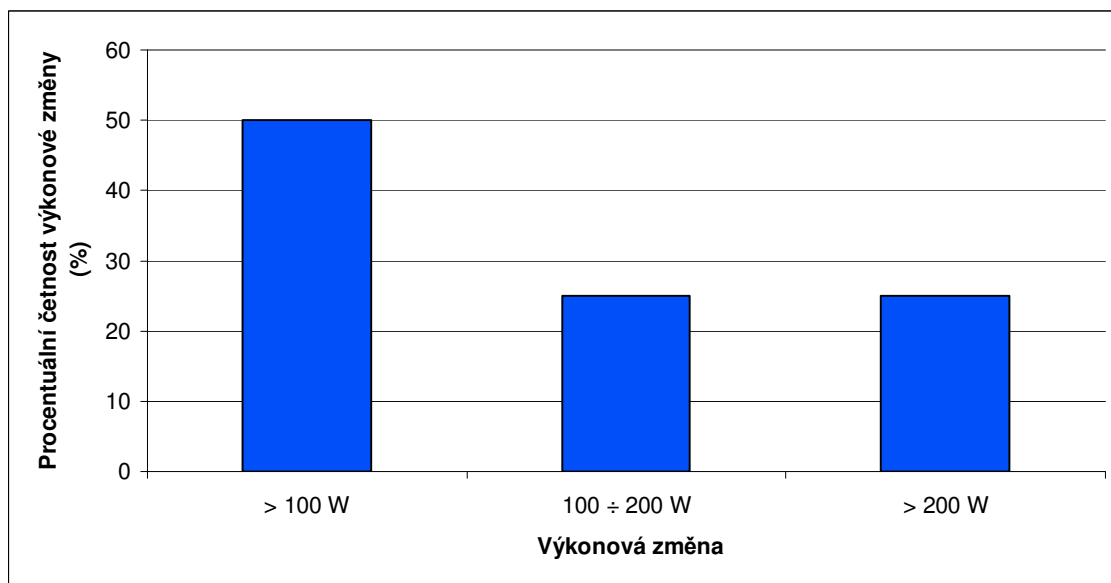
Pokud máme tedy vypočteny četnosti a relativní četnosti změny výkonu, můžeme přistoupit k vyhodnocení. Vyhodnocení četnosti změny výkonu lze provést pomocí tabulky nebo pro větší názornost graficky. Možné vyhodnocení pomocí tabulky zobrazuje tabulka (Tab.4.1), kde v prvním sloupci jsou vyšetřované výkonové změny, ve druhém číselné četnosti změny výkonu a ve třetím procentuální četnosti změny.

Tab.4.1 – Vyhodnocení četnosti výkonové změny pomocí tabulky

změna výkonu	Četnost (-)	Četnost (%)
> 100 W	1000	50
100 ÷ 200 W	500	25
> 200 W	500	25

Číselné četnosti nám ukazují počet určitých výkonových změn. Procentuální četnosti zobrazují zastoupení určité výkonové změny ve všech sledovaných výkonových změnách. Lépe ukazují celé rozložení výkonových změn. V případě, že vyšetřujeme více zdrojů elektrické energie s proměnlivým výstupním výkonem, lze při sledování stejných výkonových změn, vzájemně tyto zdroje porovnávat.

Vyhodnocení pomocí grafu ukazuje obrázek (Obr.4.8), zde je uvedena pro procentuální četnost výchylky výkonu, pro číselnou hodnotu by byl stejný průběh, jen by se vynášela číselná hodnota četnosti výkonové změny.



Obr.4.8 – Grafické vyhodnocení četnosti výkonové změny

Graf získáme z vypočtených hodnot pomocí tvorby grafu v Excelu, pro znázornění se nejlépe hodí sloupcové grafy, kde se dají vzájemně porovnat četnosti výkonových změn pro jednotlivé měsíce, nebo pro jednotlivé větrné elektrárny ve větrném parku atd.

5. Vyhodnocení stability dodávky vybraných obnovitelných zdrojů

5.1. Data z vybraných obnovitelných zdrojů

Pro vyhodnocení stability dodávky elektrické energie je použita metoda četnost výkonové změny, která je teoreticky popsána ve 4. kapitole. Pro metodu četnosti výkonové výchylky jsou potřeba jen dva základní údaje, čas a výkon. Z dalších měřených veličin byly vykresleny další charakteristiky, které se objevují v kapitolách 2 a 3. Pro vyhodnocení stability dodávky elektrické energie větrné elektrárny Veselí jsou použity dvojce data označená, jako Data 1 a Data 2, pro hodnocení stability dodávky fotovoltaické elektrárny jsou použita data z dlouhodobého měření, data jsou značena Data 3.

- **Data 1 – větrná elektrárna Veselí u Oder**

Jedná se o měřené minutové výkony z období od 25.3.2008 do 15.8.2008, měřicí záznam je v souboru xls, takže jej lze přímo upravovat v Excelu, popřípadě jiném tabulkovém procesoru. Záznam obsahuje údaje o čase, činném a jalovém výkonu, jedná se však o veličiny změřené na jedné větrné elektrárně. Tyto data slouží pouze k vyhodnocení stability dodávky elektrické energie. V měřených datech se nacházejí chyby v časové posloupnosti, tzn. že některá hodnota nebo víc hodnot chybí (Tab.5.1), avšak data od 25.3.2008 do 18.7.2008 jsou souvislá s minimálním počtem chyb.

Tab.5.1 – Chyby Data 1

2008	naměřených dat
Březen	21 %
Duben	<100 %
Květen	95 %
Červen	100 %
Červenec	57 %
Srpen	29 %

- **Data 2 – větrná elektrárna Veselí u Oder**

Změřené údaje jsou z období od 20.3.2007 do 10.5.2007, jedná se o 10-minutové výkony. Společně s činným výkonem v čase byla měřena i aktuální rychlost větru. Z těchto hodnot byla vykreslena výkonová charakteristika a tok vyrobeného výkonu, které jsou uvedeny ve 2.kapitole. Měření probíhalo na obou dvou větrných elektrárnách, a proto jsou vyhodnoceny, jak samostatné stability, tak i větrná farma, jako celek. Tyto měřená data obsahují velmi nízký počet chyb v časové posloupnosti, a proto procento změřených dat se v tomto období blíží 100 %. Data byla získána v elektronické podobě ve formátu pro Excel.

- **Data 3 – fotovoltaická elektrárna na budově NK VŠB-TU Ostrava**

Dlouhodobým měřením byla z fotovoltaické elektrárny získána data pro celý rok 2007 a část roku 2008. Měřena je spousta veličin, od činných výkonů, přes napětí a proud až intenzity slunečního záření a teploty panelů. Tyto data jsou však získávány ve formátu mdb, který je navíc uzamčen, bylo tedy nutné tyto data importovat do formátu, kde se s nimi bude moci pracovat, takový to formát souboru je například xls. Z tabulky (Tab.5.2) je zřetelné, že počty naměřených dat v roce 2007 jsou velmi dobré, naopak data z roku 2008 mají tento počet nízký, z května 2008 se jedná pouze o 11

údajů, a proto hodnoty z roku 2008 nebudou vyhodnocovány. Z těchto dat bude vyhodnocena četnost výkonové změny a dále budou použita pro porovnání stability s větrnou elektrárnou Veselí.

Tab.5.2 – Chyby Data 3

2007	naměřených dat	2008	naměřených dat
Leden	81 %	Leden	63 %
Únor	100 %	Únor	50 %
Březen	100 %	Březen	52 %
Duben	100 %	Duben	22 %
Květen	<100 %	Květen	>0 %
Červen	72 %		
Červenec	70 %		
Srpen	100 %		
Září	90 %		
Říjen	<100 %		
Listopad	98 %		
Prosinec	<100 %		

5.2. Četnost výkonových změn VtE Veselí u Oder

Měsíční četnost výkonových změn je vyhodnocena z dat Data 1. Pro každý měsíc byly vypočteny četnosti, podle postupu uvedeného ve 4. kapitole. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce, jak pro fyzikální rozdíly (Tab.5.3), kde jsou četnosti staženy na konkrétní hodnotu výkonu, tak relativní rozdíly (Tab.5.4), zde jsou četnosti staženy na procentuální část jmenovitého výkonu.

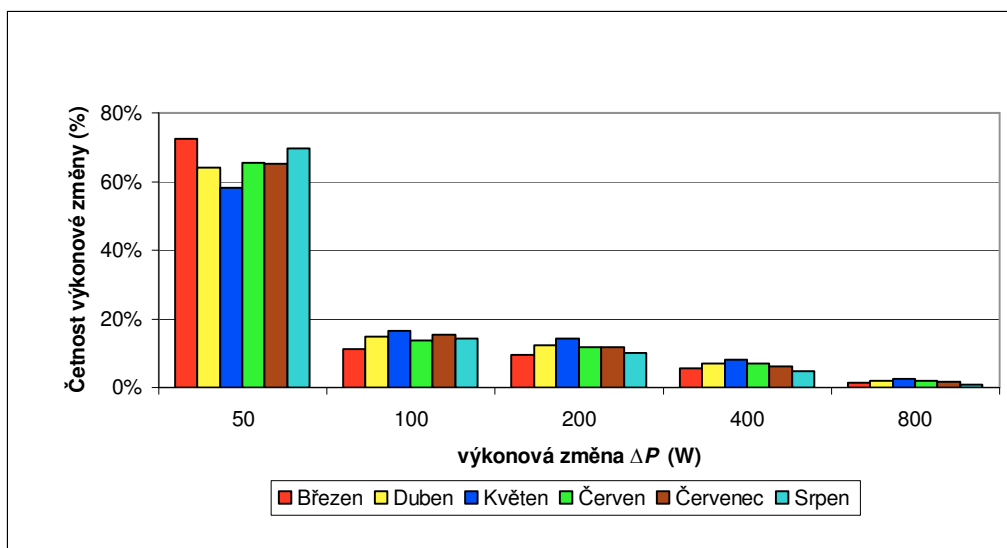
Tab.5.3 - Tabulka četností výkonových změn – fyzikální rozdíly

Změna výkonu (W)	Četnost výkonové změny (%)					
	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen
50	72,35 %	63,92 %	58,17 %	65,37 %	65,07 %	69,72 %
100	11,25 %	14,85 %	16,47 %	13,82 %	15,35 %	14,40 %
200	9,45 %	12,33 %	14,35 %	11,81 %	11,88 %	10,10 %
400	5,51 %	6,91 %	8,23 %	6,90 %	6,05 %	4,75 %
800	1,36 %	1,90 %	2,60 %	1,92 %	1,54 %	0,97 %
1000	0,08 %	0,07 %	0,12 %	0,09 %	0,07 %	0,05 %
1500	0,01 %	0,03 %	0,05 %	0,07 %	0,04 %	0,01 %
>1500	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %

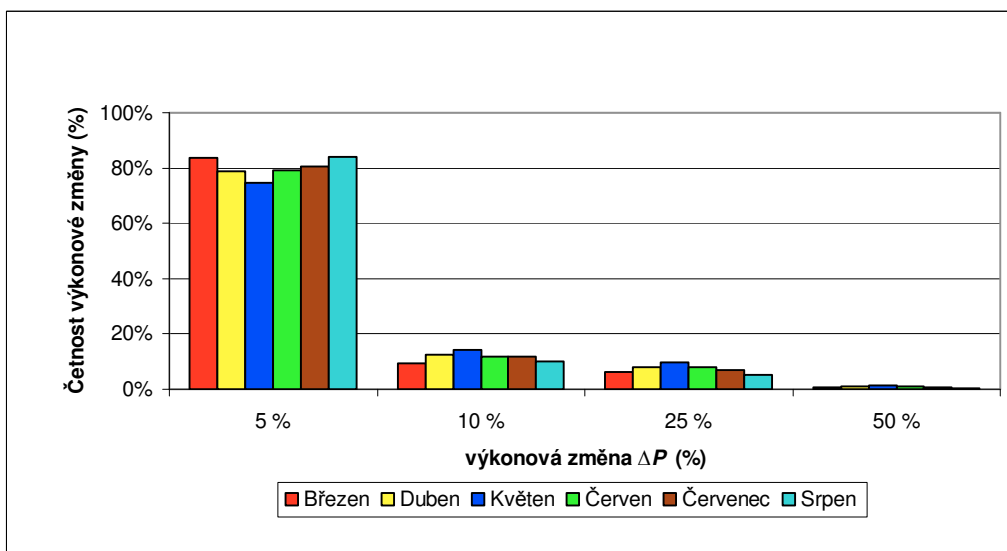
Tab.5.4 - Tabulka četností výkonových změn – relativní rozdíly

Změna výkonu (%)	Četnost výkonové změny (%)					
	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen
5 %	83,60 %	78,77 %	74,63 %	79,20 %	80,42 %	84,12 %
10 %	9,45 %	12,33 %	14,35 %	11,81 %	11,88 %	10,10 %
25 %	6,30 %	7,95 %	9,68 %	7,88 %	6,90 %	5,33 %
50 %	0,64 %	0,92 %	1,28 %	1,03 %	0,76 %	0,44 %
75 %	0,01 %	0,03 %	0,05 %	0,07 %	0,04 %	0,01 %
> 75 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %

Výsledky obou četností změny byly vyneseny i graficky. Nebyly vyneseny kategorie změn výkonů, u kterých byly hodnoty četnosti velmi malé. U fyzikálních rozdílů (Obr.5.1) nebyly vyneseny rozdíly větší než 800 W. U relativních (Obr.5.2) byly zobrazeny hodnoty 5, 10, 25 a 50 %.



Obr.5.1 – Graf četností výkonové změny pro fyzikální rozdíl



Obr.5.2 – Graf četností výkonové změny pro relativní rozdíl

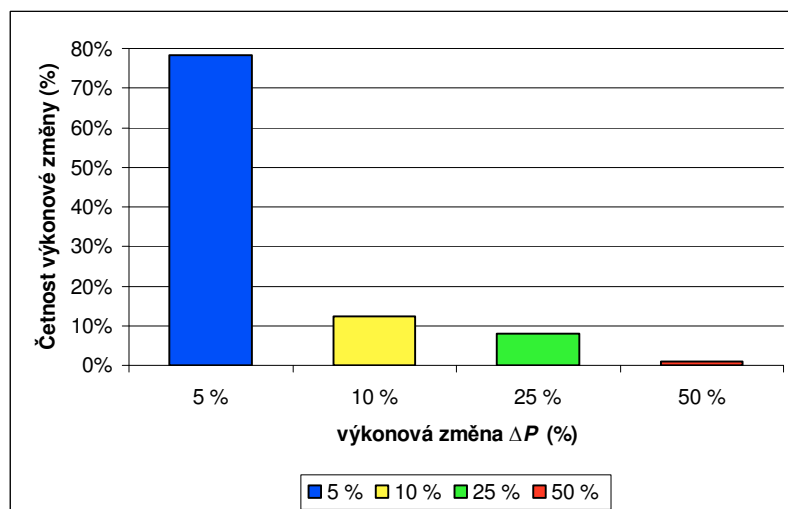
Jelikož máme souvislé měření výkonů od 15.3.2008 do 18.7.2008 s minimálním počtem chybějících údajů, bylo provedeno pro toto období také vyhodnocení četností, tyto výsledky můžeme brát jako průměrné hodnoty.

Tab.5.5 – Tabulka průměrných četností výkonové změny

Změna výkonu (%)	Četnost (%)
5 %	78,35 %
10 %	12,48 %
25 %	8,12 %
50 %	1,00 %
75 %	0,05 %
> 75 %	0,00 %

Z výše uvedených tabulek a grafů je vidět, že změna dodávaného výkonu do 5 % je nejčastější, jelikož údaje vyházejí z výkonů měřených po 1 minutě. Lze říci, že v následující minutě je téměř 80 % pravděpodobnost změny výkonu až o 5 % výkonu. V našem případě se je jmenovitý

výkon 2 MW, takže u větrné elektrárny Veselí je téměř 80 % pravděpodobnost výskytu změny až o 100 kW každou minutu. Četnost výkonových změn do 10 a 25 % jsou mnohem nižší a velké změny výkonu nastávají spíše ojediněle.

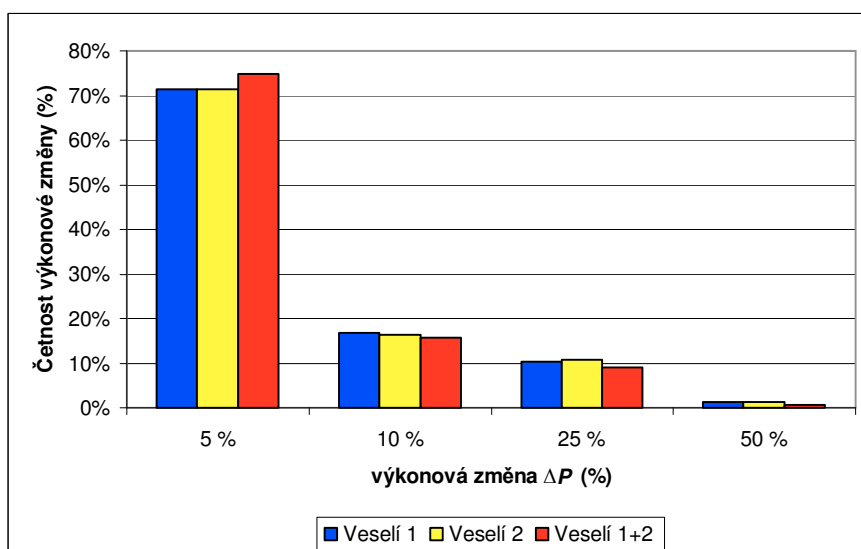


Obr.5.3 – Graf průměrných četností výkonové změny

Z naměřených dat Data 2 byly pro porovnání vypočteny (Tab.5.6) a vykresleny výsledky pro větrnou elektrárnu Veselí, jako celou farmu. V předešlých tabulkách a grafech se jedná vždy o jednu elektrárnu. V grafu (Obr.5.4) byly vyneseny jen změny výkonu, jejichž četnost byla větší než 1 %.

Tab.5.6 – Četnosti výkonových změn větrné farmy Veselí

Změna výkonu (%)	Četnost výkonové změny (%)		
	Veselí 1	Veselí 2	Veselí 1+2
5 %	71,49 %	71,46 %	74,82 %
10 %	16,78 %	16,45 %	15,61 %
25 %	10,34 %	10,72 %	8,94 %
50 %	1,36 %	1,29 %	0,59 %
75 %	0,03 %	0,06 %	0,04 %
> 75 %	0,00 %	0,03 %	0,00 %



Obr.5.4. – Graf četností výkonových změn větrné farmy Veselí

Z hodnot pro větrnou farmu je patrné, že hodnota výkonové změny do 5 % je u farmy, jako celku, v grafu i tabulce je označena Veselí 1+2, vyšší než u jednotlivých a ostatní výkonové změny jsou naopak nižší, avšak rozdíl je malý. Pokud porovnáme výsledky (Tab.5.7) z minutových a 10 minutových výkonů jsou hodnoty četnosti výkonových změn do 5 % přibližně o 8 % nižší pro 10 minutové výkony, četnosti pro větší výkonové změny jsou naopak vyšší. Tento fakt je dán tím, že v případě minutových výkonů máme zaznamenáno více změn než u 10 minutových výkonů.

Tab.5.7 – Porovnání četností minutových a 10minutových výkonů

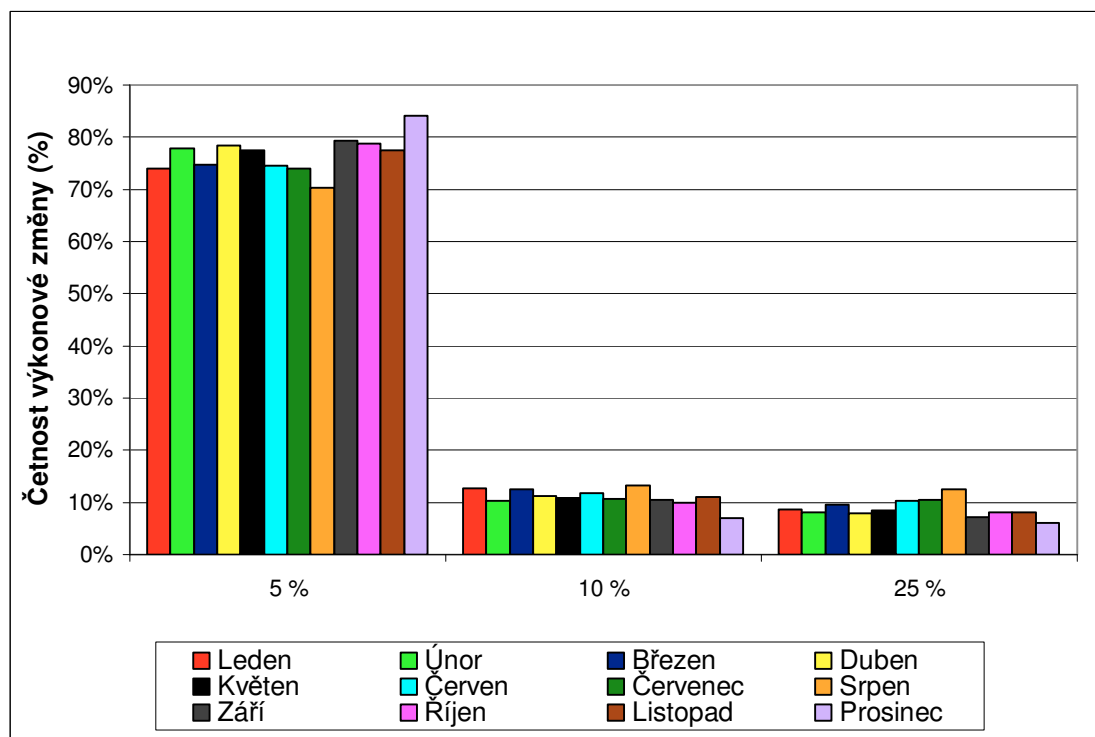
Změna výkonu (%)	Četnost výkonové změny (%)	
	minutové výkony	10minutové výkony
5 %	71,49 %	78,35 %
10 %	16,78 %	12,48 %
25 %	10,34 %	8,12 %
50 %	1,36 %	1,00 %
75 %	0,03 %	0,05 %
> 75 %	0,00 %	0,00 %

5.3. Četnost výkonových změn FVE VŠB-TU Ostrava

Z dat Data 3 je vyhodnocena četnost výkonových změn fotovoltaického systému. Vyhodnoceny jsou jednotlivé měsíce roku 2007 (Tab.5.8) a průměrná četnost změn výkonu (Tab.5.9) během stejného roku. Jelikož fotovoltaická elektrárna vyrábí elektrickou energii jen ve dne, bylo by vyhodnocení zaneseno určitou chybou. Tato chyba vzniká tehdy, když je výkon nulový, tedy v noci. Při stanovení četnosti by byla spousta nulových změn výkonu, tím by se dodávka zdála stabilní. Při vyhodnocení byla provedena eliminace těchto změn, a proto zde uvedené četnosti jsou z období, kdy elektrárna dodávala elektrickou energii do sítě. Měsíční (Obr.5.5) i průměrné četnosti (Obr.5.6) byly vyneseny i graficky. Grafy jsou vyneseny jen pro některé hodnoty výkonových změn.

Tab.5.8 – Měsíční četnosti výkonových změn FVE v roce 2007

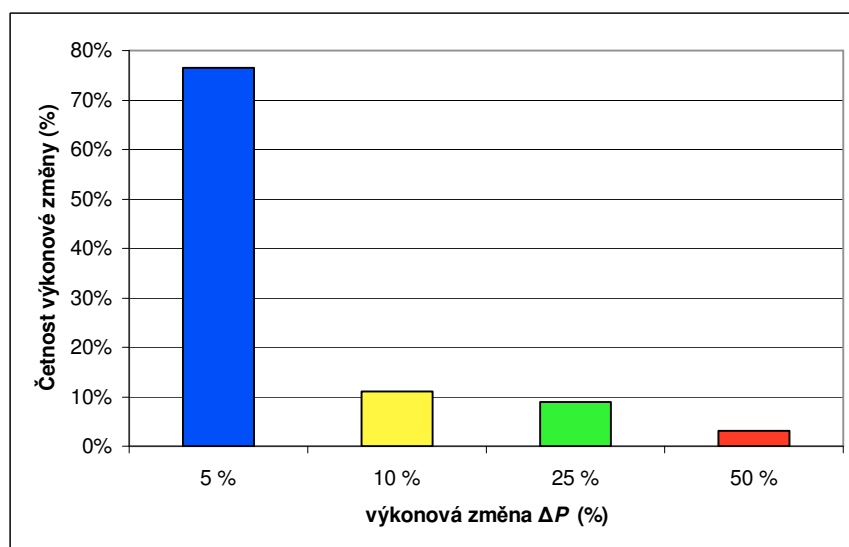
Změna výkonu (%)	Četnost výkonové změny (%)					
	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
5 %	73,95 %	77,85 %	74,67 %	78,40 %	77,50 %	74,56 %
10 %	12,61 %	10,38 %	12,57 %	11,21 %	10,78 %	11,71 %
25 %	8,57 %	8,02 %	9,64 %	7,91 %	8,54 %	10,25 %
50 %	3,96 %	3,18 %	2,93 %	2,31 %	2,75 %	3,17 %
75 %	0,91 %	0,57 %	0,19 %	0,16 %	0,40 %	0,31 %
> 75 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,04 %	0,00 %
Změna výkonu (%)	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
5 %	73,90 %	70,38 %	79,33 %	78,82 %	77,47 %	84,02 %
10 %	10,64 %	13,20 %	10,47 %	9,97 %	10,97 %	7,01 %
25 %	10,49 %	12,46 %	7,10 %	8,18 %	8,14 %	6,00 %
50 %	4,56 %	3,73 %	2,80 %	2,60 %	3,13 %	2,88 %
75 %	0,41 %	0,23 %	0,31 %	0,38 %	0,29 %	0,08 %
> 75 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,05 %	0,00 %	0,00 %



Obr.5.5 – Graf měsíčních četností výkonové změny FVE

Tab.5.9 – Průměrné četnosti výkonových změn FVE za rok 2007

Změna výkonu (%)	Četnost výkonové změny (%)
5 %	76,44 %
10 %	11,11 %
25 %	8,98 %
50 %	3,14 %
75 %	0,33 %
> 75 %	0,01 %



Obr.5.6 – Graf průměrných četností výkonové změny FVE

Z grafů a tabulek lze vyčíst rozdíl mezi letními a zimními měsíci, v letních měsících je patrná menší hodnota četnosti výkonové změny pro výkonové změny do 5 %, naopak pro vyšší výkonové změny o 25, 50 a 75 % jsou četnosti vyšší. Dynamika výroby v létě je dána výraznou změnou intenzity slunečního záření, intenzita dopadajícího záření je závislá na oblačnosti a také v tomto období jsou výrazné špičky intenzity záření, pokud při této špičce dojde ke změně je tato změna velká. V červenci se četnost změny výkonu při změně od 25 do 50 % dostala téměř k 5 %, to je téměř jedna změna z 20.

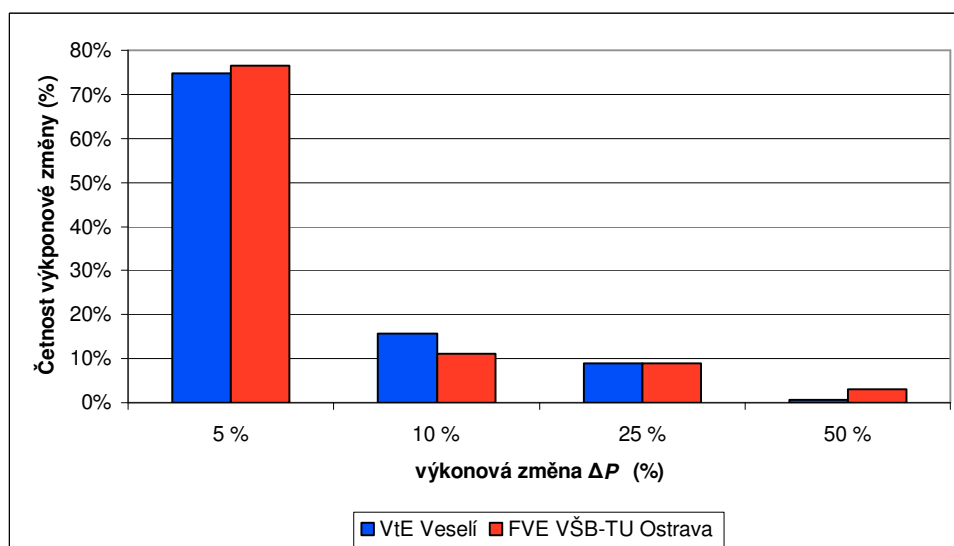
5.4. Porovnání četností výkonových změn VtE a FVE

Pro porovnání četností výkonových změn byly vybrány průměrné hodnoty z FVE (Tab.5.9) a průměrné hodnoty z větrné farmy Veselí (Tab.5.6.). Četnosti výkonových změn jsou zobrazeny v tabulce (Tab.5.10), pro lepší znázornění je porovnání vyneseno i graficky (Obr.5.6.)

Tab.5.10 – Porovnání četností výkonových změn

Změna výkonu (%)	Četnost výkonové změny (%)	
	VtE Veselí	FVE VŠB-TU Ostrava
5 %	74,82 %	76,44 %
10 %	15,61 %	11,11 %
25 %	8,94 %	8,98 %
50 %	0,59 %	3,14 %
75 %	0,04 %	0,33 %
> 75 %	0,00 %	0,01 %

Z uvedených hodnot pro porovnání je patrné, že četnosti výkonových změn jsou si podobné, ale jasně ukazují rozdíl mezi větrnými a fotovoltaickými elektrárnami. Větrné elektrárny, jako zdroj mají vítr. Průběh větru se nemění skokově a tím se ani dodávaný výkon nemění skokově, proto hodnoty četností změn výkonu pro velké změny jsou minimální. Sluneční záření, které je zdroj energie pro fotovoltaické elektrárny, se naopak skokově mění. Proto četnost výkonových změn pro vyšší změny výkonu jsou větší.



Obr.5.7 – Porovnání četností výkonových změn VtE a FVE

Závěr

Jedním z cílů diplomové práce bylo popsat možnosti výroby elektrické energie z větru a slunce. Vývoj větrné a fotovoltaické techniky je velmi dynamický. S rozvojem obou dvou technologií, klesla pořizovací cena na nákup těchto technologií a se zvýšenou výkupní cenou elektrické energie se tyto zdroje velmi rozšířily. Oba dva druhy těchto zdrojů není možnost regulovat, jejich výroba je dynamická a vyjádřit tuto dynamičnost bylo hlavním cílem diplomové práce.

Pro vyhodnocení byla vytvořena metoda četnosti změny výkonu, tato četnost nám říká kolik bylo určitých výkonových změn ve sledovaném období. Tuto četnost lze použít i jako pravděpodobnost výskytu změny výkonu. Metoda vychází z naměřených činných výkonů v určitých časových intervalech, tyto změřené hodnoty jsou pak zpracovány pomocí tabulkového editoru, který má možnost analýzy dat – histogramu. Konkrétně byl použit program Microsoft Excel 2003.

Pro konkrétní vyhodnocení byly vybrány dva obnovitelné zdroje elektrické energie, větrná farma Veselí u Oder a fotovoltaická elektrárna umístěná na budově NK VŠB-TU Ostrava. Součástí diplomové práce je i popis obou elektráren. Každá elektrárna byla vyhodnocena samostatně, u větrné farmy Veselí proběhlo srovnání jedné větrné elektrárny s větrnou farmou, jako celek. Při tomto klesne četnost výkonových změn pro vyšší hodnoty změn, tzn. velkých změn výkonů nastává mnohem méně, ale tento rozdíl je velmi malý. U fotovoltaické elektrárny je hodnocena četnost změn výkonu jen při výrobě elektrické energie. Při porovnání větrné a fotovoltaické elektrárny dostáváme podobné výsledky. U fotovoltaických elektráren dostáváme větší četnost velkých výkonových změn. Zde se prakticky ukazuje rozdíl mezi větrnou a fotovoltaickou energetikou. U větrných elektráren jsou změny malé, to je dáno změnou rychlosti větru, ten se mění průběžně. Naopak u fotovoltaických elektráren je zdroj energie intenzita slunečního záření, ta se především v době větší oblačnosti mění i skokově, a proto vyšla četnost velkých výkonových změn vyšší oproti větrné elektrárně.

Uvedená metoda vyhodnocuje dynamiku obnovitelných zdrojů elektrické energie a lze ji použít pro hodnocení provozu obnovitelných zdrojů. Metodiku lze dále použít pro predikci výroby a modelování provozu elektrických sítí v simulačních programech.

Literatura

- [1] RYCHETNÍK, Václav; PAVELKA, Jiří; JANOUŠEK, Josef. *Větrné motory a elektrárny*. 1.vydání. Praha : ČVUT, 1997. 199 s. ISBN 80-01-01563-7.
- [2] QUASCHING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1.vydání. Praha : Grada Publishing, 2010. 296 s. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [3] MOTLÍK, Jan, et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich využití pro ČR*. Praha : ČEZ, 2007. 183 s.
Dostupné z WWW:
<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf>.
- [4] HAU, Erich. *Wind turbines : fundamentals, technologies, application, economics*. 2.vydání. Berlín : Springer, 2006. 783 s. ISBN 3-540-24240-6.
- [5] PROKOP, Lukáš; MIŠÁK, Stanislav; KREJČÍ, Petr. Analysis of Long time WPP PowerFlows Measurement.
In RUSEK, Stanislav; GOŇO, Radomír. *Electric Power Engineering 2009 : proceedings of the 10th international scientific conference : May 12-14, 2009, Hotel Dlouhé Stráně, Kouty nad Desnou, Czech Republic*. Ostrava : VŠB-TUO, 2009. 414 s. ISBN 978-80-248-1947-1.
- [6] Kolektiv autorů. Cyklus přednášek: *Rozvoj vysokoškolského vzdělávání v oblasti obnovitelných a alternativních zdrojů energie*
Ostrava : 2009, číslo grantové smlouvy 3/005/08/2,
Dostupné z WWW:
<rccv.vsb.cz/Island/docs/Uvod_do_OAZE.pdf>,
<rccv.vsb.cz/Island/docs/Fotovoltaika.pdf>,
<rccv.vsb.cz/Island/docs/Fotovoltaika2.pdf>,
<rccv.vsb.cz/Island/docs/Fotovoltaika3.pdf>.
- [7] LADENER, Heinz; SPÄTE, Frank. *Solární zařízení*. 1.vydání. Praha : Grada Publishing, 2003. 267 s. ISBN 80-247-0362-9.
- [8] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Zdroje a využití energie*. 1.vydání. Praha : ČZU, 2007. 141 s. ISBN 978-80-213-1647-8.
- [9] HENZE, Andreas; HILLEBRAND, Werner. *Elektrický proud ze slunce : fotovoltaika v praxi : technika, přehled trhu, návody ke stavbě*. 1.vydání. Ostrava : HEL, 2000. 136 s. ISBN 80-86167-12-7.
- [10] GOETZBERGER, Adolf; HOFFMANN, Volker U. *Photovoltaic solar energy generation*. Berlín : Springer, 2005. 232 s. ISBN 3-540-23676-7.
- [11] *Zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů*
Zákon č.180/2005 Sb.
- [12] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 2/2010 ze dne 8. listopadu 2010*
Dostupné z WWW:
<http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR%206_2010.pdf>

- [13] VRTEK, Mojmír; PUMPRLA, Oto; HORÁK, Bohumil. Hodnocení provozu fotovoltaické elektrárny na VŠB-TU Ostrava .
Alternativní energie. 2007, roč.10, č.5, s. 20-21. ISSN 1212-1673.
- [14] *Fotovoltaický systém o výkonu 20 kWp pro vědecko-výzkumné účely a výuku na univerzitě*
Technický popis pro účely žádosti o dotaci ze SFŽP
- [15] *Katalogový list solárních panelů Solartec řada SCO72*
- [16] *Savoniův rotor*
Dostupné z WWW:
<<http://www.reuk.co.uk/OtherImages/savonius-wind-turbine3.gif>>
- [17] *Průběh výkonového součinitele C_p*
Dostupné z WWW:
<http://buckville.com/drupal/misc/turbine_efficiency.jpg>
- [18] *Solární věžová elektrárna*
Dostupné z WWW:
<http://thefraserdomain.typepad.com/energy/images/molten_salt_system.jpg>
- [19] *Solární žlabová elektrárna*
Dostupné z WWW:
<<http://www.solarpanelsplus.com/images/spp-solar-trough-diagram.jpg>>
- [20] Solární talířová elektrárna
Dostupné z WWW:
<http://www.linvents.com/03_solar_fuel_producer/Images_Solar_Tech/Solar-Dish-Principle.jpg>
- [21] *Solární komínová elektrárna*
Dostupné z WWW:
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/00/Solar_updraft_tower.svg/400px-Solar_updraft_tower.svg.png>
- [22] *VA charakteristika solárního článku*
Dostupné z WWW:
<<http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals3/figure3.gif>>
- [23] *Závislost charakteristiky solárního článku*
Dostupné z WWW:
<http://advansolar.net/main/img_1251126363_14854_1252725712.gif>
- [24] *Závislost charakteristiky solárního článku*
Dostupné z WWW:
<http://advansolar.net/main/img_1251126363_14854_1252725712.gif>
- [25] HRADÍLEK, Zdeněk; VYSLOUŽIL, Martin. Stochastics in the Electricity Generation in Wind and Photovoltaic Power Stations.
In DRÁPELA, Jiří; MACHÁČEK, Jan. *Electric Power Engineering 2010 : proceedings of the 11th international scientific conference*
Brno: VUT, 2010. 861 s. ISBN 978-80-214-4094-4

- [26] Výzkum spoľehlivosti energetických soustav v souvislosti s ekologií netradičních zdrojů a oceněním nedodané energie
MSM 6198910007
Dostupné z WWW:
<<http://cez451.vsb.cz/annotation.html>>
- [27] XIE, Le, et al. Wind Integration in Power Systems: Operational Challenges and Possible Solutions
Proceeding of the IEEE. 2011, roč.99, č.1, s.214-232. ISSN 0018-9219
- [28] RUSEK, Stanislav; STŘÍDA, František; MACH, Martin. The problems of electrical distance in connection with the operation of wind power generator
In RUSEK, Stanislav; GOŇO, Radomír. *Electric Power Engineering 2009 : proceedings of the 10th international scientific conference : May 12-14, 2009, Hotel Dlouhé Stráně, Kouty nad Desnou, Czech Republic*.
Ostrava : VŠB-TUO, 2009. 414 s. ISBN 978-80-248-1947-1.
- [29] GRÜNBAUM, Rolf. FACTS for Grid Integration of Wind Power
In BERTLING, Lina. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*
Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2010. ISBN: 978-1-4244-8509-3
- [30] WU, Jie; CHEN, Yuanrui. Agent-Based Energy Management and Control of a Grid-Connected Wind/Solar Hybrid Power System.
In GU, C.L. *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*.
Wuhan : World Publishing Corporation, 2008. ISBN 978-1-4244-3826-6.

Všechny zde uvedené internetové odkazy byly funkční k 1.3.2011.